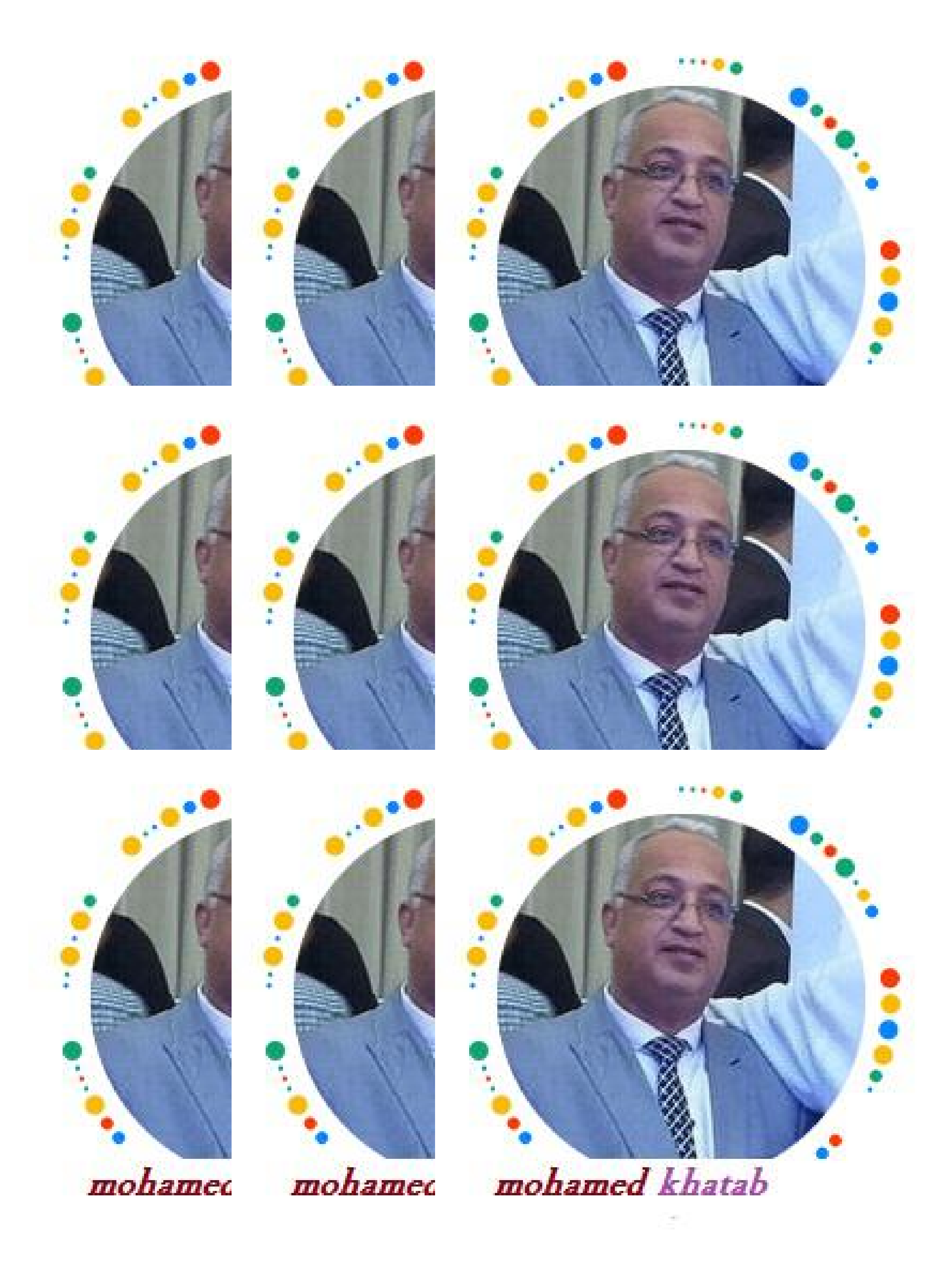
ثمانية احتمالات مستبعدة

لغز القمر وحقائق علمية أخرى لا تُصدق

جون جريبين



ترجمة إبراهيم سند أحمد


mohamed khatab

ثمانية احتمالات مستبعدة

لغز القمر وحقائق علمية أخرى لا تُصدق

تأليف

جون جريبين

ترجمة

إبراهيم سند أحمد

مراجعة

شيماء طه الريدي



ثمانية احتمالات مستبعدة

Eight Improbable Possibilities

جون جريبين

John Gribbin

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٩ ٢٨٣٨ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢١.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٢.

المحتويات

إشادة بكتاب ستة أشياء مستحيلة

«كتاب تمهيدي عن كل ما يتعلَّق بالكَمِّ ... يمتاز بالدقة وسلاسة الأسلوب.»

صنداي تايمز

«ألهم جريبين أجيالًا بمؤلَّفاته في العلوم المبسَّطة، وهذا الكتاب، الذي يُعَد أحدث مؤلَّفاته، هو ملخَّص موجز وممتع للمتبارين الأساسيين في تقديم تفسير حقيقي لميكانيكا الكم. ... إن لم تنتَبك الحَيرة من قبلُ حول ما ترمي إليه أنجح نظرياتنا العلمية، أو حتى إن سبق وانتابتك تلك الحَيرة وتريد أن تعرف آخر ما توصَّل إليه الفكر، فسيقدِّم لك هذا الكتاب الجديد كل المعلومات التي سبقَت انهيار الدالَّة الموجية.»

جيم الخليلي

«يقدِّم لنا جريبين وجبة دسمة من المعلومات تتسم بالدقة والوضوح؛ إذ يزخر هذا الكتاب على صغره بكمٍّ هائل من المعلومات. يضم الكتاب بين دفَّتَيه كَمًّا عظيمًا من كتب العلوم المبسَّطة، وأنا أحبه. ... يمكن القول إن هذا الكتاب هو أفضل وأعظم ما أنتجَت العلوم المبسَّطة البريطانية؛ لأنه يوجز نتاج سنوات عديدة من الدراسة في طبيعة فيزياء الكَم في كُتيب صغير.»

براين كليج، popularscience.co.uk

«كتاب رائع وسهل الفهم ... أنصح به بقوة لطلاب العلوم والمتحمِّسين للخيال العلمي، وكذلك أي شخص لديه فضول لفهم العالم الغريب لفيزياء الكم.»

مجلة «فوربس»

إشادة بكتاب سبعة أعمدة للعلم

«في العامَين الماضيَين شهدنا سلسلة من الكتب تراكِم أكداسًا من العلوم في شكل مبسَّط ومفهوم في مساحة صغيرة. وقد أثبت جون جريبين نفسه أستاذًا لهذا النهج بكتابه «ستة أشياء مستحيلة»، ثم أثبتها مرة أخرى ... بكتاب «سبعة أعمدة للعلم»، هذا الكتاب اللطيف المباشر الذي يزخر بكَمٍّ هائل من المعلومات. ... إنه يتناول الكثير من الموضوعات العلمية ويسرد حكاية مثيرة للاهتمام، وله غِلاف جميل.»

برايان كليج، popularscience.co.uk



إهداء إلى ستيف جيست، الذي يقدِّر مثل هذه الأشياء!

شكر وتقدير

مرة أخرى أتقدَّم بالشكر إلى مؤسَّسة «ألفريد سي مونجر» على الدعم المالي، كما أتقدَّم بالشكر إلى جامعة ساسكس على توفير المقر والمرافق البحثية.

وكما هو الحال في جميع كتبي، حرصَت ماري جريبين على ألَّا أَحيد بعيدًا وأهيم وسط أدغال الغموض. وأدين لها في هذا الكتاب على وجه الخصوص فيما يتعلَّق بالاحتمال المستبعد الثامن. جميع الأخطاء بالطبع هي أخطائي.

«بعدما تستبعد المستحيل، فما يبقى لديك، مهما كان مستبعدًا، لا بد أن يكون هو الحقيقة.»

مغامرة تاج الزمرد
آرثر كونان دويل

مقدمة
ما الذي نعلمه؟

يتعامل العلم مع المجهول. في بعض الأحيان، يتعاطف أصدقائي من غير العلماء عندما تتصدَّر أخبار ما يُعتبَر «فشلًا» لإحدى النظريات العلمية عناوين الصحف. وقد حدث هذا مؤخَّرًا مع ظهور الاكتشاف الخاص بتسارع تمدُّد الكون، والحاجة إلى تعديل نموذجنا المبسَّط للانفجار العظيم. فأجدهم يقولون: «لا بد أنك محبط للغاية لأن نظريتك الجميلة تبيَّن أنها خاطئة.» على النقيض تمامًا! إن العالِم الحاذق يبتهج عندما يشير دليل جديد إلى الحاجة إلى أفكار جديدة لتفسير ما يجري في العالم. فالأفكار الجديدة هي شريان الحياة للعلم، ولو كانت جميع نظرياتنا تقدِّم وصفًا دقيقًا ومثاليًّا للكون (وأعني بذلك كل ما في الكون، وليس كوكب الأرض فقط)؛ لَمَا تبقَّى للعلماء شيء يقومون به.

قد تندهش من وجود أي شيء يمكن أن يقدِّمه العلم على الإطلاق. فمن واقع ما نعرفه عن نواميس الكون، ما الذي يتبقَّى للعلم كي يكتشفه؟ ولكن في التاريخ دَرْس تحذيري يحذِّر من مثل هذا التهاون. فقُبيل نهاية القرن التاسع عشر، ساد شعور واسع النطاق بين الفيزيائيين بأن نظرية إسحاق نيوتن عن الجاذبية، ونظرية كلارك ماكسويل عن الكهرومغناطيسية، صارتا تحوزان كل الأدوات اللازمة لوصف الكون، ولم يَعُد متبقيًا في الكون اكتشافات جوهرية يُسعى إليها. ولكن في عام ١٨٩٤، قال عالم الفيزياء الأمريكي ألبرت أبراهام ميكلسون، المعروف بعمله في قياس سرعة الضوء:

> بينما يجب عدم التأكيد على خلو مستقبل علم الفيزياء من خبايا أعجب ممَّا اكتُشف في الماضي، لا يبدو مُستبعدًا أن تكون أغلب المبادئ الأساسية الكبرى قد ترسَّخت بقوة، وأنه ينبغي السعي لتحقيق مزيد من التطورات، لا سيما في

التطبيق الصارم لهذه المبادئ على جميع الظواهر التي نرصدها. وهنا تظهر أهمية علم القياس؛ حيث تكون الفيزياء الكَمية مطلوبة أكثر من الفيزياء النوعية. وقد أشار فيزيائي بارز إلى ضرورة البحث عن الحقائق المستقبلية في علم الفيزياء في القياسات الدقيقة.

حسنًا فعل بأن أشار إلى ذلك في هذا التنبيه الاستهلالي؛ لأنه في أعقاب تلك الملاحظة، تواترت اكتشافات النشاط الإشعاعي والنظريات الخاصة والعامة عن النسبية وفيزياء الكم. ولا شك أنها كانت معجزات مدهشة أكثر من اكتشافات الماضي. لم يتعلَّم العلماء قط أن يقولوا إن كل ما يتبقَّى هو التدقيق وإضافة التفاصيل إلى نظرياتهم المفضلة.

كيف يمكن أن يكون هناك الكثير من الخبايا لم تُكتشف بعد، في حين أن ثمة الكثير من الأمور قد عُرف بالفعل؟ ثمة تشبيه قياسي قد يُفيد في هذا الصدد. لنقل إن كل ما نعرفه عن الكون تمثِّله مساحة داخل دائرة صغيرة مرسومة على قطعة ورق كبيرة ومسطحة. كل ما نعرفه داخل تلك الدائرة، وكل ما لا نعرفه خارج تلك الدائرة. كلما اكتشفنا المزيد عن نواميس الكون؛ اتسعت الدائرة. وكلما اتسعت الدائرة؛ اتسع محيطها كذلك؛ أي الحد الفاصل بين ما نعرفه وما لا نعرفه. وكما جاء في أغنية «لافين سبونفول»: «إنها لا تزال لغزًا، كلما رأيت المزيد، علمت أن هناك المزيد لم أرَه بعد.» إن بانتظار العلماء كَمًّا هائلًا من العمل في المستقبل القريب. وهذا العمل يبدأ بوضع فرضيات (أو تخمينات) عن نواميس الكون، ثم إجراء التجارِب أو تسجيل الملاحظات لاستبعاد التخمينات غير الصحيحة.

هل يبتهج أنصار نظرية النسبية عندما تؤكِّد ملحوظة جديدة عن الكون — كما يُحب أن يعبِّر عنها الصحفيون — أن «أينشتاين كان على حق»؟ إلى درجة معيَّنة فحسب. فما كان سيثير حماسهم أكثر هو ملاحظة تُوضِّح أن النظرية العامة للنسبية جيدة إلى حد ما، ولكن ربما لا تثبت صحتها في كل مكان وزمان. وهذا هو السبب وراء إجراء مثل هذه التجارِب. فلا تُجرى التجارِب من أجل «إثبات أن أينشتاين كان على حق»، وإنما تُجرى على أمل الكشف عن الظروف أو المواضع التي يمكن أن تخطئ فيها نظرية أينشتاين في الكون.

لذا على الرغم ممَّا قد يتردَّد في وسائل الإعلام العامة، فالعلماء الحاذقون لا يُجرون التجارِب من أجل إثبات صحة نظرياتهم الأثيرة[١] (بالطبع هناك علماء مزيَّفون يفعلون ذلك، ولكن ليس لهم مكان هنا). بل يُجرون التجارِب لاكتشاف مكمن الخطأ في النظرية، وهو ما يرشدهم إلى الطريق نحو الاكتشافات الجديدة (والطريق إلى الفوز بجائزة نوبل، إن كنت تهتم بتلك الأشياء).

وحسب ملاحظة ريتشارد فاينمان الشهيرة التي تقول:

> إذا تعارضت النظرية مع التجرِبة؛ فإن النظرية خاطئة. تحمل تلك الجملة البسيطة مفتاح العلم. فلا يهم مدى روعة التخمين، ولا يهم مدى ما تتحلَّى به من ذكاء، أو من وضع التخمين، أو اسمه؛ فإذا تعارضت النظرية مع التجربة؛ فالنظرية خاطئة.

تلك المقولة هي المعادل العلمي لمقولة كونان دويل. فالتجرِبة (أو الملاحظة) هي الوسيلة التي يستبعد بها العلماء المستحيل. وقد أطلق توماس هنري هكسلي على هذا «المأساة الكبرى للعلوم — نحر فرضية جميلة بسكين حقيقة قبيحة.»

لكن العالِم الحاذق لا يذهب إلى حيث يذهب دويل. فبمجرَّد استبعاد المستحيل، فإن ما يتبقَّى يقع تحت بند الاحتمالات بالتأكيد، في ضوء المعرفة المتوافرة في الوقت الحاضر، ولكن ربما لا يكون هو الحقيقة المطلقة. بل قد يأتي دوره ليُذبَح بسكين حقيقة قبيحة. ومع أخذ ذلك في الاعتبار، يكون علينا أن نوجِّه انتباهنا إلى بعض من الحقائق العلمية المستبعدة (في ضوء المعرفة المتوافرة في الوقت الحاضر).

جون جريبين
مايو ٢٠٢٠

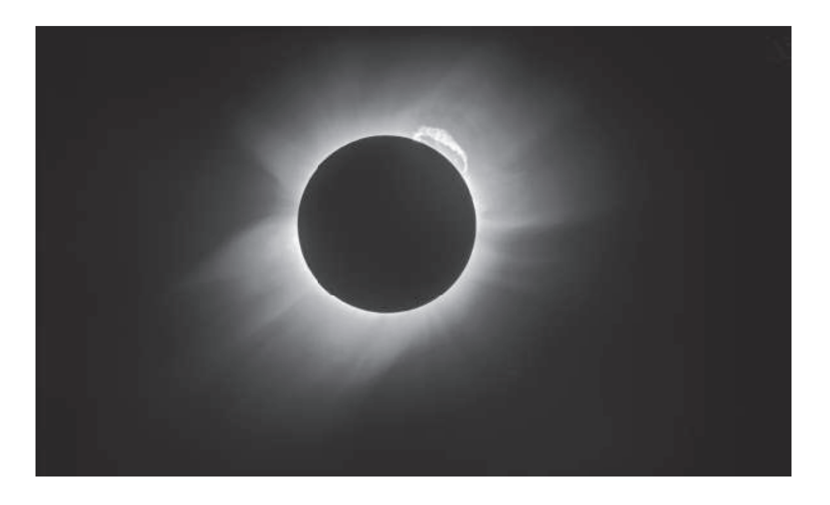
هوامش

(١) بالطبع هناك علماء مزيَّفون يفعلون ذلك، ولكن ليس لهم مكان هنا.

الاحتمال المستبعد الأول:
لغز القمر

الكسوف الكلي للشمس من أروع المشاهد التي تُرى من فوق سطح الأرض وأجملها. وتكمن تلك الروعة في أننا نرى القمر والشمس بحجم واحد. لذا عندما يمر القمر من أمام الشمس، فإنه يمكن أن يغطِّي قرص الشمس الوهَّاج تمامًا، مغرقًا المنطقة المتأثِّرة بالكسوف في الظلام، ولكنه يسمح برؤية الطبقة الخارجية المتوهِّجة من الشمس — هالة الشمس — كأنها هالة مجيدة. ولكن لماذا نحن محظوظون للغاية لرؤية ذلك المشهد؟ ما وجه التكافؤ التام في الحجم الظاهري للشمس والقمر حتى ينتج هذا المشهد؟ السؤال أعمق ممَّا يبدو عليه للوهلة الأولى؛ لأن التطابق لم يكن كاملًا على الدوام. تمر حضارتنا الإنسانية بلحظة نادرة من الزمن الفلكي عندما يصبح القمر في المكان المثالي كي يحدث هذا النوع من الكسوف. في الماضي الجيولوجي غير البعيد، كان القمر على مسافة قريبة للغاية من الأرض، وكان يطمس الهالة الشمسية أيضًا؛ أمَّا في المستقبل الفلكي، فسيبتعد عن الأرض مسافة بعيدة، وسنراه مثل فقَّاعة مظلمة صغيرة تمر من أمام قرص الشمس. ولكن هذا الافتراض مستبعد ولن تثبت «صحته التامة» إلا وقتما نرصده بأعيننا.

لكن هذا التأثير يحدث أصلًا لأن حجم القمر كبير للغاية. ونظرًا لأنه منفصل عن الأرض ويمثِّل نسبة معتبرة من حجم الكوكب الأب (الأرض)، فإنه يُعَد أكبر قمر على الإطلاق في المجموعة الشمسية. في الحقيقة، يرى العديد من علماء الفلك أن منظومة الأرض والقمر ينبغي أن تُرى كوكبًا مزدوجًا، وليس كوكبًا وقمرًا. ويعود هذا كله إلى طريقة تشكيل الكوكب المزدوج.



كسوف الشمس (ساينس فوتو ليبراري).

تشكَّلت الشمس والمجموعة الشمسية عندما انهارت سحابة من الغازات والغبار في الفضاء بفعل جاذبيتها. دخل الجزء الأكبر من المادة إلى النجم المركزي، ألَا وهو الشمس. وتبقَّى جزء من الغبار والجسيمات الجليدية في قرص حول النجم، ثم اصطدمت جسيمات ذلك الغبار والتصقت بعضها ببعض حتى أصبح جزء منها كبيرًا لدرجة كافية تُمكِّنها من جذب الجسيمات الأخرى نحوها بفعل جاذبيتها، حتى تراكمت أجسام أكبر وأكبر. وأدَّى هذا في النهاية إلى تكوين الكواكب، ولكن تُرك جزء من المادة لتشكِّل أجسامًا أصغر ألَا وهي الكويكبات والمذنَّبات. لم تكن المراحل الأخيرة من تلك العملية يسيرة بأي حال؛ لأن الكواكب الأولية قُصفت بحطام المادة وهي تُزيح مداراتها حول الشمس. ويمكن استخلاص لمحة عن شكل ذلك القصف من وجه القمر المحطم الذي تعرَّض للقصف، ولكن هذا لا يمثِّل إلا جزءًا ضئيلًا من القصة الكاملة؛ لأن القمر نفسه لم يتكوَّن إلا بعد الانتهاء من الجزء الأكبر من عملية تكوين الكوكب.

من السهل تفسير وجود الأقمار التي نراها تدور حول الكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية، مثل المريخ والمشتري وزحل. إن الأقمار التي تدور حول المريخ عبارة عن أجزاء صغيرة من الحطام — الكويكبات — خلَّفتها عملية تشكل الكواكب، ومِن ثَم اجتذبها المريخ إليه. أمَّا أقمار الكواكب الضخمة مثل المشتري وزحل، فهي أكبر من الكويكبات بكثير، ولكن الكواكب الضخمة أكبر من المريخ بكثير. وتكوَّنت مجموعاتها من الأقمار حول

الكواكب التي تدور حولها بالطريقة نفسها التي تكوَّنت بها تلك الكواكب التي تدور حول الشمس، ما يجعلها صورة مصغَّرة من «المجموعات الشمسية». ولكن حجم القمر يعادل ٢٥ بالمائة من حجم الأرض، من حيث القُطر، ومن الواضح أنه تكوَّن بطريقة مختلفة. والتفسير الأفضل لذلك هو أنه في غضون بضعة ملايين من السنين مِن تكوُّن الأرض، أُقحم الكوكب في تصادم مع كوكب آخر أصغر — جسم بحجم المريخ — ما أصاب الأرض بضربة خاطفة. وبفعل الحرارة التي تولَّدت من هذا الحدث العنيف، دُمِّر الجسم الصادم، وذابت قشرة الأرض الأولية الحديثة التكوين. غاص اللب المعدِني الثقيل للجسم الصادم في مركز الأرض وامتزج مع لب الأرض المعدِني كي يجعل للكوكب لبًّا شديد الكثافة وقشرة رقيقة نسبيًّا. وترجع رقة القشرة إلى أن المادة المنصهرة الناتجة عن الاصطدام، وهي عبارة عن مزيج من مواد من كوكب الأرض الأولي والجسم الصادم — الذي يشير إليه علماء الفلك بيانيًّا باسم الاصطدام العملاق — ينطلق في الفضاء، فترك جزء منها الأرض تمامًا، فيما بقي بعضها ليشكِّل حَلْقة حول الأرض، والتحم القمر عن طريق تلك الحَلْقة. يسهل تذكُّر المدة التي استغرقتها تلك العملية؛ إذ تخبرنا تطبيقات المحاكاة الحاسوبية أن تكوين شيء يشبه القمر من شأنه أن يستغرق شهرًا بحسابات العصر الحالي بعد الاصطدام. كذلك يشير تأريخ عينات الصخور القمرية إلى أن كل هذا قد وقع منذ ما يقرب من ٤٫٤ مليار سنة. وقد تسبَّب الاصطدام، من ضمن أشياء أخرى، في جعل الأرض تدور بسرعة حول محورها، وأخرجها من الوضع الرأسي، ما تسبَّب في الميل المسئول عن دورة فصول السنة الأربعة.

كل هذا يفسِّر العديد من الغرائب عن كوكب الأرض. إن حجم كوكب الزُّهَرة، الذي يقع بجانب الأرض من جهة الشمس، يساوي حجم كوكب الأرض تقريبًا، ولكن له قشرة سميكة ولبًّا معدِنيًّا صغيرًا؛ ما جعل مجاله المغناطيسي ضئيلًا. وهو يدور حول الشمس مرة واحدة فقط كل ٢٤٣ يومًا من أيام الأرض. أمَّا الأرض فتمتاز بقشرة رقيقة ولب معدِني كبير هو المسئول عن المجال المغناطيسي القوي والدوران السريع نسبيًّا، واجتذاب قمر كبير إليها. وتلك السمات تتناغم بعضها مع بعض تناغمًا تامًّا. إن كوكبنا هو الكوكب الغريب في المجموعة الشمسية؛ إذ إنه نتاج سلسلة أحداث مستبعدة تمامًا، كلها مرتبطة بالقمر. وتبعات تلك الأحداث بعيدة المدى.

لنتناول مسألة السُّمك الرفيع لقشرة الأرض. قد لا يبدو الأمر معضلة كبيرة، ولكنه كذلك. فالقشرة رقيقة للغاية لدرجة أنها يمكن أن تتصدَّع مثل قشرة البيضة، وتتحرَّك

أجزاء من القشرة بفعل التيارات الناقلة في الطبقات السائلة تحت القشرة الأرضية، وذلك في إطار العملية المعروفة باسم تكتونيات الصفائح. وبفضل السُّمك الرقيق للقشرة، لا يتوقَّف النشاط البركاني حول حواف أجزاء تلك القشرة (الصفائح)؛ ما يؤدِّي إلى إطلاق غازات مثل ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء في الغلاف الجوي. وحيثما تتصدَّع القشرة، وهو ما يحدث عادة تحت المحيطات، يمكن أن تتشكَّل قشرة جديدة بفعل تدفُّق المادة المنصهرة إلى أعلى وتصلُّبها، لتنتشر على جانبَي الصدع، دافعة الصفائح بعيدًا على كل جانب. ولكن حجم الأرض يتوقَّف عن التزايد؛ لأن في أجزاء أخرى من الكرة الأرضية، خاصة عبر حواف القارات، تنضغط القشرة الأرضية إلى الداخل. وهذه العملية تعيد المواد الكربونية والماء إلى أسفل حيث تغذيها البراكين، ثم تنبعث مرة أخرى في الجو في دورة لا تنتهي.

ولكن الدورة لا تسير بسرعة ثابتة. ويُطلَق على العملية التي تسحب الغازات، مثل ثاني أكسيد الكربون، من الغلاف الجوي، اسم التجوية. يتحلَّل ثاني أكسيد الكربون في الماء، ثم يتفاعل مع المعادن الموجودة في الصخور ليتكوَّن منه كربونات الكالسيوم (الحجر الجيري). وبالطبع يُعَد ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من الغازات الدفيئة؛ لأنه يحبس الحرارة ويبقي سطح الأرض دافئًا أكثر ممَّا كان سيصبح عليه لولاه. والواقع أنه عندما ترتفع حرارة الأرض، تسير عملية التجوية بإيقاع أسرع؛ ومِن ثَم تميل إلى سحب ثاني أكسيد الكربون من الجو بكفاءة، ما يسمح بانخفاض حرارة الكوكب. ولكن عندما تنخفض درجة الحرارة، تقل كفاءة التجوية، ويتراكم غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو مرة أخرى. وعليه، ترتفع حرارة الأرض، وتتسارع عملية التجوية؛ ما يؤدِّي إلى سحب المزيد من غاز ثاني أكسيد الكربون من الجو. وثمة تأثير سلبي يرجع إلى تكتونيات الصفائح، يساعد في إبقاء درجة الحرارة على سطح الأرض في نطاق يسمح ببقاء المياه السائلة (ولكن للأسف تلك العمليات الطبيعية أبطأ من أن تعوِّض عن تراكم غاز ثاني أكسيد الكربون، الذي يتسارع بشدة الآن بسبب أنشطة البشر؛ كي تستطيع حمايتنا من عواقب حماقتنا). وبدون هذه العملية — أي بدون القشرة الرقيقة التي نشأت عن الاصطدام الذي أدَّى إلى نشأة القمر — لربما أصبحت الأرض صَحْراء حارقة ذات غلاف جوي سميك من ثاني أكسيد الكربون، مثلما هو الحال في كوكب الزُّهَرة المجاور لنا.

ليس هذا هو الشيء الوحيد الذي ينبغي أن نكون شاكرين للقمر لأجله. فتحليل الموجات الزلزالية الناتجة عن الزلازل، والتعمُّق عبر طبقات الأرض الداخلية، يُظهر لنا الحجم الهائل للب المركزي للأرض. واللب المركزي عبارة عن كتلة صلبة من الحديد

والنيكل يبلغ قُطرها حوالي ٢٤٠٠كم، وتقع قمتها على مسافة ٥٢٠٠كم تقريبًا تحت سطح الأرض. ولكنه محاط بطبقة من مادة سائلة تمتد على مسافة ٢٥٠٠كم أخرى إلى أعلى؛ أي نحو نصف المسافة إلى سطح الأرض من قمة اللب الداخلي. يحوي اللب الخارجي واللب الداخلي معًا ثلث كتلة كوكب الأرض، التي يرجع جزء منها إلى الجسم الصادم الذي أدَّى إلى نشأة القمر. واللب الخارجي هو المهم بالنسبة إلينا، وإلى الحياة بأكملها على الأرض. تصل درجة الحرارة في هذه الطبقة السائلة المكوَّنة من الحديد والنيكل إلى نحو ٥٠٠٠ درجة مئوية؛ أي أقل بقدر طفيف من درجة حرارة سطح الشمس، وتظل هكذا بفعل التحلل الإشعاعي لعناصر، مثل الثوريوم واليورانيوم، التي خلَّفها تكوين المجموعة الشمسية. وتعمل التيارات الدُّوامية في هذه الطبقة على توليد المجال المغناطيسي للأرض.

يُعتبر المجال المغناطيسي للأرض مجال قوة بالمعنى الحرفي للكلمة؛ إذ يحمي كوكبنا من تهديد خطير قادم من الفضاء. فالشمس تطلق عاصفة من جسيمات ذات شحنة كهربائية، يُطلَق عليها «الرياح الشمسية»، على سبيل التخفيف، والتي تنبعث من مصدرها عبر الفضاء، وتتجاوز الأرض والكواكب الأخرى. تنتقل هذه الجسيمات بسرعات تبلغ عدة مئات من الكيلومترات في الثانية في أغلب الأحيان، وتصل إلى ١٥٠٠ كيلومتر في الثانية في أثناء الانفجارات المعروفة باسم العواصف الشمسية. ومن دون التأثير الواقي للمجال المغناطيسي الذي يشكِّل طبقة واقية حول الأرض، يمكن لهذه «الأشعات الكونية الشمسية»، التي لا تختلف عن الإشعاع الجسيمي الصادر من قنبلة نووية، يمكن أن تزيل الطبقات الخارجية للغلاف الجوي وتخترق الأرض، حيث كانت ستتسبَّب في أضرار فادحة لأشكال الحياة، بل ربما كانت ستتسبَّب في جدب سطح الكوكب.

يُطلَق على المنطقة المحيطة بالأرض التي يحميها المجال المغناطيسي اسم الغِلاف المغناطيسي، ولكن كلمة «غِلاف» ليست في محلِّها في الواقع؛ لأن الرياح الشمسية تتسم بقوة شديدة، لدرجة أنها تسحق المجال المغناطيسي في الجانب المواجه للشمس، بينما على الجانب المواجه للأرض يمتد المجال المغناطيسي على شكل ذيل طويل، ما يجعل الشكل العام يبدو مثل شرغوف كوني. في الجانب المواجه للشمس يقع الحد الفاصل بين المجال المغناطيسي والرياح الشمسية (هيكل سفينة الفضاء «إيرث») على مسافة ٦٤٠٠٠كم فوق سطح الأرض؛ أمَّا على الجانب البعيد عن الشمس، يتمدَّد الحد الفاصل إلى مسافة تكاد تماثل المسافة بين الأرض والقمر. وعند القطبَين المغناطيسيَّين؛ الشمالي والجنوبي، تتسرَّب نسبة ضئيلة من جسيمات الرياح الشمسية إلى الجزء العلوي من الغِلاف الجوي للأرض.

وفي معظم الأحيان، يكون التأثير الوحيد لهذا الأمر هو تلك المشاهد الجميلة المعروفة باسم الشفق القطبي الشمالي والشفق القطبي الجنوبي. ولكن في أثناء العواصف الشمسية، قد تُلحق التأثيرات عند خطوط العرض العليا دمارًا بأي شيء يستخدم الكهرباء. فهي تقطع وسائل الاتصالات، وتؤثِّر على خطوط الكهرباء، وتسبِّب انقطاعات للتيار الكهربي في أماكن مثل كندا. وإذا ضعف الغلاف المغناطيسي فجأة؛ فسيحدث ذلك في سائر أنحاء كوكب الأرض.

ثمة حقيقة جادة تتمثَّل في وجود أدلة جيولوجية على وقوع مثل تلك الأحداث في الماضي، من خلال اختفاء المجال المغناطيسي فجأة (بناءً على معايير الجدول الزمني الجيولوجي) وإعادة تكوينه، إمَّا على النحو الموضَّح فيما سبق، أو بعكس القطبَين المغناطيسيَّين الشمالي والجنوبي. تأتي هذه الأدلة من السجل المغناطيسي المتروك في بعض أنواع الصخور أثناء تصلُّبها بعد موجات الثوران البركاني. ففي مرحلة تجمُّد الصخور، يتجمَّد فيها المجال المغناطيسي، ما يشكِّل مغناطيسًا دائمًا يحافظ على اتجاه الشمال واتجاه الجنوب في ذلك الزمن. ويمكن تحديد تاريخ الصخور بعدة وسائل لبيان وقت الاختفاء التدريجي للمجال المغناطيسي. كذلك تُظهر السجلات الأحفورية للحياة على الأرض أنه عند ضعف المجال المغناطيسي، تنقرض العديد من الأنواع على الأرض على الرغم من عدم تأثُّر المخلوقات التي تعيش في المحيطات. والاستنتاج الطبيعي من ذلك أن المخلوقات الأرضية قد صُعقت بإشعاع قادم من الفضاء، في حين أن المخلوقات البحرية كانت في حماية طبقات المياه. ولكن حتى لو كان هذا التفسير خاطئًا، فلا مفر من حقيقة أن المخلوقات الأرضية تموت عندما يضعف المجال المغناطيسي. الأمر المحبط أن المجال المغناطيسي للأرض، على مدى العقود الأخيرة، كان يضعف بمعدل يتراوح بين ٥ بالمائة في القرن، و٥ بالمائة في العَقد. وإذا استمرَّ هذا الضعف؛ فربما يختفي المجال المغناطيسي في مدة تتراوح بين ٢٠٠٠ و٢٠٠ سنة من الآن.

على الرغم من أن قُطر القمر يعادل ربع قُطر الأرض، فإن كتلته تعادل ثُمن كتلة الأرض فقط، ويرجع السبب جزئيًّا إلى اكتساب الأرض بعض العناصر الثقيلة التي كوَّنت لب الأرض خلال الاصطدام الذي تسبَّب في نشأة القمر، بينما تطايرت المواد الأخف في الفضاء. ولكن حتى في ظِل تلك الظروف، يظل ذلك العامل الذي يجعله الأكبر بالنسبة إلى كوكبه في المجموعة الشمسية.[١] لهذا السبب، كان تأثير الجاذبية لدى القمر على الأرض، ولا يزال، عاملًا رئيسًا على كوكب الأرض منذ حدوث الاصطدام العملاق. ويتجلَّى أكثر

مظاهر هذا التأثير وضوحًا اليوم في المد والجزر، ولكن هذه ليست سوى أمواج ضعيفة في البحر مقارنة بما كانت عليه في الماضي.

توضِّح تطبيقات المحاكاة الحاسوبية أنه عندما تكوَّن القمر في البداية، كان يدور على ارتفاع ٢٥٠٠٠كم فقط فوق سطح الأرض مقارنة بمتوسط الارتفاع اليوم الذي يتجاوز ٣٨٤٠٠٠ كيلومتر بقليل. ولم يكن من شأن هذا الارتفاع أن يثير تيارات مد هائلة في أيٍّ من المحيطات التي كانت موجودة فحسب، بل في الأرض «اليابسة» أيضًا؛ إذ يعمل على تمدُّد الصخور وانضغاطها على مدى كيلومتر واحد تقريبًا بإيقاع منتظم. في البداية، حافظت الحرارة التي تُولِّدها هذه العملية على الصخور منصهرة حتى بعد وقوع الاصطدام العملاق؛ ومِن ثَم شمل تأثير المد والجزر محيطات الحمم البركانية. ولكن طاقة تلك العملية جاءت من الطاقة المدارية للقمر، وعندما تبدَّدت الطاقة أدَّى هذا إلى إضعاف قبضة القمر وتحرُّكه إلى الخارج، بينما كانت تيارات المد والجزر تتضاءل. وتشكَّلت قشرة صلبة في مدة مليون سنة تقريبًا بعد الاصطدام الذي أدَّى إلى ظهور القمر.

وبفضل الاصطدام كانت الأرض أيضًا تدور بسرعة حينذاك؛ ولذا كان اليوم مدته نحو خمس ساعات، وقتما كان القمر حديث التكوين. أمَّا اليوم، فصار لدينا تيارات مد وجزر يبلغ ارتفاعها نحو متر، تحدث مرتين في اليوم — أي كل اثنتَي عشرة ساعة أو نحو ذلك — مع وجود تفاوتات ناتجة عن الجغرافيا المحلية للخطوط الساحلية. بعد تكوُّن القمر مباشرة (أي منذ مليون سنة أو نحو ذلك)، كانت هناك تيارات مد وجزر يبلغ ارتفاعها عدة كيلومترات كل ساعتَين ونصف تقريبًا. وظهرت أشكال للحياة من البحر، وانتقلت إلى اليابسة منذ ما يقرب من ٥٠٠ مليون سنة، وحتى بعد مرور مائة مليون سنة — أي منذ ٤٠٠ مليون سنة، في مصادفة عددية لا تنسى — كانت السنة حوالي ٤٠٠ يوم؛ لأن الأرض كانت لا تزال تدور أسرع من دورانها اليوم بنسبة ١٠ بالمائة، ومِن ثَم كان عدد ساعات اليوم يتجاوز ٢١ ساعة بقليل. ولكن على مدى مليارات السنين التي مرَّت منذ تكوُّن القمر، ظل شيء واحد ثابتًا نسبيًّا، ألَا وهو ميَلان الأرض. ومرة أخرى يعود الفضل للقمر في ذلك.

الأجسام الدوَّارة ذات الميل متذبذبة، مثلما يعلم أي شخص سبق أن لعب بلعبة البلبل الدوَّار الخاصة بالأطفال. ولكن يوجد أكثر من نوع من التذبذب. تميل الأرض في الفضاء بنحو ٢٣٫٤ درجة من خط متعامد بزوايا قائمة على مستوى مدار الأرض حول الشمس. وكما ذكرت، نتج هذا الميل عندما اصطدمت الأرض في بداية نشأتها بجسم بحجم كوكب

المريخ أثناء الاصطدام الذي أدَّى إلى نشأة القمر. وعلى مدى العام، دائمًا ما يكون الميل في الاتجاه نفسه، ولذا عندما تدور الأرض حول الشمس، فإنها تميل باتجاه الشمس في بعض الأحيان، وتبتعد عنها في أحيان أخرى. وهذه ليست ذبذبة كما قد تتصوَّر، إذا افترضت أن الشمس تدور حول أرض ثابتة. ينتج عن هذا الميل دورة الفصول، إذ حين يُطل فصل الصيف على نصف الكرة الأرضية المائل نحو الشمس، يكون النصف المقابل في الشتاء، وحين يطل فصل الشتاء على نصف الكرة الأرضية البعيد عن الشمس، يكون النصف المقابل في فصل الصيف.

لقد حرصت على قول إن الميل دائمًا ما يكون في اتجاه واحد «على مدى عام واحد»؛ لأنه في الواقع يتغيَّر قليلًا على نحو منتظم على مدى عشرات الآلاف من السنوات. هذا الميل في الحقيقة هو عبارة عن ذبذبة، وله تداعيات شديدة وغير محتملة بالنسبة إلى الحياة على كوكب الأرض، أتناولها بالنقاش في الاحتمال المستبعد الثامن. ولكن في هذا الجزء ينصبُّ اهتمامي أكثر على السبب وراء عدم كبر الذبذبة أكثر من ذلك. ويرجع هذا بالطبع إلى التأثير المثبِّت لجاذبية القمر. فالكواكب (والأقمار) في المجموعة الشمسية تنجذب بعضها إلى بعض بفعل الجاذبية، ما ينتج عنه تأثير يتغيَّر مع حركة الكواكب حول مداراتها، وتكون الكواكب الصغرى مثل الأرض والمريخ على وجه الخصوص معرَّضة للتأثيرات المزدوجة للأجسام الكبرى في المجموعة الشمسية، وهما الشمس والمشتري. لو كان كوكب مثل الأرض أو المريخ هو الكوكب الوحيد الذي يدور حول الشمس، لاستمرَّ في مداره من دون ذبذبة. ولكن حتى دفعات الجاذبية الصغيرة القادمة من الشمس والمشتري يمكن أن تحفِّز ذبذبات كبيرة — وإن كان هذا مستبعدًا كما قد يبدو — من خلال العملية المعروفة باسم الفوضى، الوارد ذكرها في الاحتمال المستبعد السادس.

توضِّح لنا تطبيقات النمذجة الحاسوبية أن الميل على المريخ، الذي ليس له قمر كبير، يمكن أن يتغيَّر فجأة بما لا يقل عن ٤٥ درجة، وبسرعة أبطأ بنحو ٦٠ درجة، حيث «فجأة» تعني على مدار ١٠٠٠٠٠ سنة تقريبًا. على الرغم من ذلك، لا ينبغي أن نعتمد على النمذجة الحاسوبية وحدها؛ لأن السمات السطحية لكوكب المريخ تخضع للدراسة الآن عن طريق تدوير مسابير فضائية حوله بمزيد من التفصيل للتأكُّد من حدوث هذا النوع من التغيير بالفعل على مدى الزمن الجيولوجي. فهذا من شأنه أن يمنحنا الثقة في التنبؤات التي يخرج بها النوع نفسه من النمذجة المطبَّقة على كوكب الأرض، التي توضِّح لنا أنه لولا وجود القمر لكان من الممكن أن تَحيد عن وضعها شبه المستقيم في مدارها، إلى وضع شبه مسطح

مع حدوث «ميل» بمقدار ٩٠ درجة على مدى ١٠٠ ألف سنة، وهي فترة قصيرة. وكان ذلك سيؤدِّي إلى تداعيات وخيمة. فمع وجود قطب متجه نحو الشمس، سيتعرَّض ذلك النصف من الكرة الأرضية لصيف حارق شديد الحرارة لا تغرب الشمس فيه أبدًا، بينما سيتجمَّد النصف المقابل لأن الشمس لا تشرق عليه. ثم سينعكس الوضع بعد ستة أشهر. فتصبح المناطق الاستوائية في غسق دائم، ولن يذوب الجليد منها مطلقًا. والفضل كله يعود إلى وجود القمر في عدم حدوث شيء من هذا منذ نشأة الحياة على اليابسة (بناءً على ما نعرفه من السجلات الأحفورية)، وربما لمدة أطول من ذلك بكثير (حسبما نستنتج من تطبيقات النمذجة الحاسوبية).

الأمر بالطبع أكثر مثالية من أن يستمرَّ إلى الأبد. فمع ابتعاد القمر عن الأرض ببطء ولكن بشكل مُطَّرد، سيضعف تأثيره المُثبِّت رويدًا رويدًا. لا يزال القمر مقترنًا بالأرض ويمارس تأثيره منذ أكثر من ٤ مليارات سنة، وهو الآن يتحرَّك إلى خارجها بمعدل ٤ سنتيمترات في السنة. وتوضِّح تطبيقات المحاكاة أنه في غضون نحو مليارَي سنة من الآن سيكون تأثيره المثبِّت أضعف كثيرًا من أن يمنع المشتري من الإطاحة بالأرض. تعيدني تلك النقطة إلى الاحتمال المستبعد الذي بدأت به. الشمس أكبر من القمر بمقدار ٤٠٠ ضعف، ولكن المسافة بينها وبين الأرض أبعد من المسافة إلى القمر بمقدار ٤٠٠ ضعف أيضًا. في الماضي كان القمر يبدو بحجم أكبر بكثير؛ ومِن ثَم كان من السهل أن يحجب الشمس أثناء أي كسوف. لكن في عصر الديناصورات، لم يكن هناك بشر كي يرصدوا تلك الظاهرة. وفي المستقبل غير البعيد (قبل حدوث تلك الذبذبة بزمن طويل)، ستُرى حلقة من ضوء الشمس حول حافة القمر حتى في أثناء الكسوف. حينئذٍ قد توجد كائنات ترصد تلك الظاهرة وقد لا توجد. يا له من أمر غريب أن يكون لزامًا أن توجد الكائنات الذكية التي ترصد مثل هذه الأشياء في اللحظة التي تحدث فيها من الزمن الجيولوجي. نحن هنا فقط بفضل القمر وتأثيره على الأرض. لعله احتمال مستبعد كثيرًا، لكنه غير مستحيل، حسبما تبرهن الحقيقة التي أخبركم بها عنه.

هوامش

(١) إذا أردت أن تجادل بأن بلوتو كوكب وله قمر ضخم نسبيًّا، وهو القمر شارون، فسيكون ردي أن بلوتو-شارون هو كوكب مزدوج.

الاحتمال المستبعد الثاني: للكون بداية، ونحن نعرف متى كانت

صارت فكرة أن الانفجار العظيم هو أصل الكون معروفة لدرجة أنها باتت فكرة عادية. حتى إنها كانت تُستخدم في المملكة المتحدة للإشارة إلى التحرير المفاجئ للأسواق المالية الذي حدث في عهد مارجريت تاتشر. لكن فكرة وجود بداية للكون مستبعدة كثيرًا لدرجة أن العلماء لم يتطرَّقوا إليها حتى إلا منذ مائة عام، ولم تترسَّخ إلا منذ نحو ٥٠ عامًا.

كان الكون في نظر القدماء، الذين كانوا ينظرون في سماء الليل، يبدو سرمديًّا ولا يتغيَّر. وحتى عشرينيات القرن العشرين كان يُعتقد أن ما نعرفه الآن باسم مجرة درب التبانة — وهي جزيرة تضم بضع مئات المليارات من النجوم — هو الكون بأكمله، يمكن أن تولد فيه نجوم منفردة، وتحيا وتموت، ولكن الشكل العام ظل دومًا على ما هو عليه، مثل غابة تنمو فيها الأشجار فُرادى، وتموت من دون أن يتغيَّر شيء في شكلها العام. كانت فكرة الكون الذي لا يتغيَّر مترسِّخة في الأذهان بقوة، لدرجة أن حتى ألبرت أينشتاين الذي يميل عادة إلى الخروج بأفكار جديدة، تقبَّلها دون أي اعتراض أو تردُّد. وعندما طبَّق معادلات نظريته العامة في النسبية كي يصف سلوك الكون بأكمله (في المكان والزمان)، وجد أن الرياضيات تقول إن الكون لا يمكن أن يكون ثابتًا، بل لا بد أنه يتمدَّد أو ينكمش. بدا له هذا الاحتمال مستبعدًا لدرجة أنه أضاف عاملًا إضافيًّا إلى المعادلات، أطلق عليه الثابت الكوني؛ كي يُبقي كل شيء ثابتًا على ما هو عليه.

في بداية عشرينيات القرن العشرين، أدَّت تقنيات التصوير الفوتوغرافي وأجهزة التلسكوب المطوَّرة إلى اكتشاف أن مجرة درب التبانة ليست هي الكون بأكمله، ولكنها مجرَّد جزيرة واحدة من النجوم من بين جزر أخرى متناثرة عبر أنحاء الفضاء الفسيح. ولكن في البداية، ظلَّت هذه الفكرة تبدو متناسبة مع فكرة الكون الثابت، وإن كان على

نطاق أوسع. بعد ذلك، في أواخر عشرينيات القرن العشرين، اكتشف كلٌّ من جورج لوميتر وإدوين هابل (بناءً على تأثير الانزياح نحو الأحمر الشهير) أن المجرات (أو تحريًا للدقة، عناقيد المجرات) يتحرَّك بعضها بعيدًا عن بعض؛ أي إن الكون يتمدَّد. فُسر هذا الاكتشاف على أنه راجع إلى تمدُّد الفضاء، وهذا ما يتطابق تمامًا مع معادلات أينشتاين «بدون» الثابت الكوني. وفيما بعدُ وُصف إدخال ذلك الثابت بأنه «الخطأ الأفدح» في حياته المهنية. فبقدر ما بدا ذلك مستبعدًا كان الكون يتمدَّد بالفعل.

ولكن هل يعني ذلك أن الكون كانت له بداية؟ ليس بالضرورة. فقد ذهب بعض علماء الكونيات إلى أن المجرات ما دامت تتحرَّك بعيدًا بعضها عن بعض اليوم، فقد كانت مجتمعة معًا منذ زمن بعيد في كتلة واحدة، أشبه ببيضة كونية، انفجرت مكوِّناتها وانفصلت بعضها عن بعض. ولكن ثمة مدرسة فكرية أخرى تعتقد أنه بما أن المجرات كانت تتحرَّك بعيدًا بعضها عن بعض، فإن الحيِّز الفارغ بينها قد امتلأ بمجرات جديدة نشأت بفعل طاقة بدائية. لم تكن فكرة استمرار خلق المادة تبدو أقل استبعادًا من فكرة أن المادة في الكون خُلقت جميعها دفعة واحدة فيما يشبه بيضة كونية. فالخلق المستمر من شأنه أن يتيح للكون أن يصبح سرمديًّا وثابتًا في شكله العام على الرغم من تمدُّده. وحَظِي نموذج «الحالة الثابتة» هذا بتأييد فريد هويل، الذي صاغ مصطلح «الانفجار العظيم» في بث إذاعي عبر هيئة الإذاعة البريطانية لإبراز الفرق بين الفكرتَين.[١] يرى هويل وغيره من أنصار فكرة الحالة الثابتة أن فكرة وجود بداية محدَّدة للكون تبدو مستبعدة إلى الحد الذي يحول دون أخذها على محمل الجد. وتبيَّن فيما بعدُ أنهم ليسوا وحدهم في هذا الرأي. فبعد اكتشاف تمدُّد الكون بفترة وجيزة، وجَّه ألبرت أينشتاين في عام ١٩٣١ اهتمامه لتداعيات هذا الاعتقاد. فكتب مُسَوَّدة لبحثٍ توصَّل فيه إلى الفكرة نفسها التي صاغها هويل بالضبط قبل عَقد ونصف العَقد؛ إذ كتب يقول:

> إذا تأمَّل المرء كتلة ذات حدود مادية، فسيجد جسيمات المادة تتركها باستمرار. وكي تظل الكثافة ثابتة، لا بد أن تتكوَّن جسيمات المادة باستمرار في الكتلة من الفراغ.

غير أنه انصرف إلى عمل آخر ولم ينتهِ من البحث حتى ينشره. ومِن ثَم ظل البحث مهملًا في الأرشيفات حتى عثر عليه كورماك أورايفرتاي وبريندان ماكان، بمعهد ووترفورد للتكنولوجيا، بعد ثمانية عقود بطريق المصادفة، وترجماه ونشراه بالإنجليزية

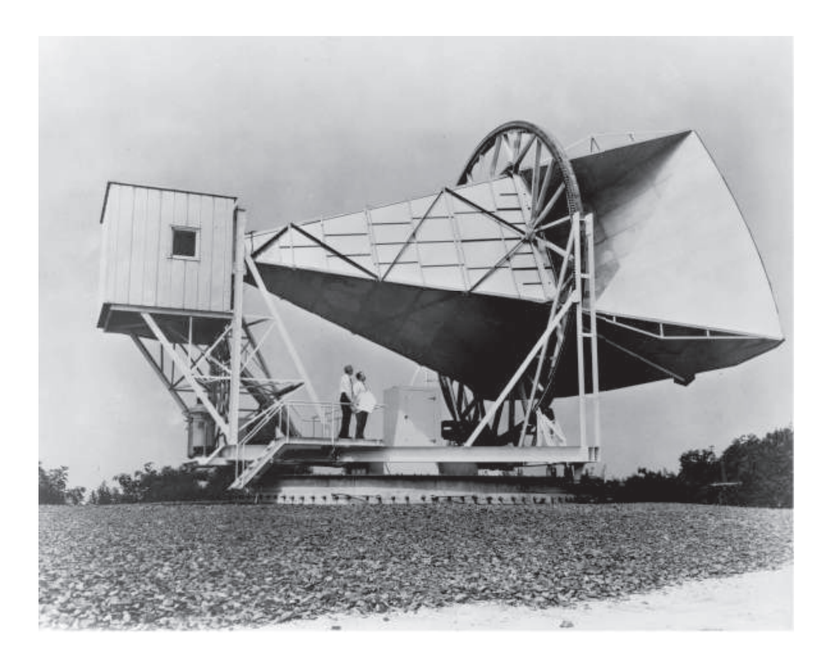
في عام ٢٠١٤. لذا إذا تساءل أحد من أول شخص توصَّل إلى فكرة الحالة الثابتة/الخلق المستمر، فإن الإجابة هي أينشتاين!

احتدم السجال بين المعسكرَين على مدى عقد الخمسينيات من القرن العشرين، واستمرَّ إلى الستينيات من القرن نفسه. وتطلَّب الأمر إجراء اختبار للتمييز بين تنبؤات الفكرتَين، وظهرت فكرة لواحد بالفعل — ولكن لم تُنفَّذ في البداية — تقريبًا في الوقت الذي ظهرت فيه فكرة الحالة الثابتة لأول مرة. اعتمد الاختبار في المقام الأول على فكرة أنه لو كان الكون أصغر حجمًا في الماضي، وسُحِق كل ما فيه معًا بإحكام، فلا بد أن حرارته أيضًا كانت أشد حينذاك، مثلما تشتد حرارة الهواء في مضخة الدرَّاجة عند ضغطه. وبناءً على المبادئ الفيزيائية الأساسية، حسب باحثان أمريكيان شابان هما رالف ألفر وروبرت هيرمان، الحرارة المفترضة للكون عندما كان في كثافة نواة الذرة وقت الانفجار العظيم،[٢] ومدى الحرارة المفترضة اليوم للإشعاع الذي خلَّفه الانفجار العظيم. وفي عام ١٩٤٨، نشرا الاستنتاج الذي توصَّلا إليه، والذي مفاده أن «درجة حرارة الكون في الوقت الحاضر قد تبيَّن أنها تساوي نحو ٥ درجات على مقياس كلفن»، وهو ما يساوي ٢٦٨ درجة مئوية تحت الصفر. وحظيت فكرتهما بدعم زميلهما الأكبر سنًّا جورج جاموف الذي غالبًا ما يرتبط اسمه بالمعادلة الحسابية لدرجات الحرارة، على الرغم من أنه لم ينفِّذها عمليًّا.

دخل هذا التنبؤ في طي النسيان إلى حد بعيد في خمسينيات القرن العشرين، ولكن في أوائل ستينيات القرن نفسه؛ أي منذ أقل من ٦٠ عامًا، اكتشف كل من أرنو بنزياس وروبرت ويلسون، وكانا يعملان على تلسكوب راديوي تمتلكه مختبرات بيل — عن طريق الصدفة — أن الكون مليء ببحر من الإشعاع الميكروي تبلغ درجة حرارته نحو ٣ درجات كلفن، وتحدَّدت فيما بعدُ بمزيد من الدقة بمقدار نحو ٢٫٧ درجة كلفن. وكانت المفاجأة التي وجداها مزدوجة؛ لأنهما لم يكونا على دراية بعمل ألفر وهيرمان، فضلًا عن أن كلَيهما كانا من أنصار فكرة الحالة الثابتة. لكنهما استبعدا تلك الفكرة عن طريق الخطأ واعتبراها مستحيلة. وسرعان ما أدركا أنه لا بد أن هذا الإشعاع هو ما تنبَّأ به ألفر وهيرمان، وأن ثمة انفجارًا عظيمًا قد حدث بالفعل، على الرغم من أن العديد من علماء الفلك كانوا لا يزالون يعتبرونه مستبعدًا. إذن، «متى» وقع الانفجار العظيم؟ كم يبلغ عمر الكون؟

اعتمدت الطريقة الأساسية لحساب ما مر من الزمن منذ حدوث الانفجار العظيم على قياس السرعة التي تتحرَّك بها المجرات بعيدًا عنَّا (الجزء السهل)، وقياس بُعدها (الجزء الصعب) بحيث يتمكَّن علماء الفلك من التحرُّك بصورة عكسية لمعرفة متى كان كل شيء مجتمعًا في مكان واحد. هذه عملية حسابية تافهة؛ فإذا كانت سيارة تسير على

طريق سريع مستقيم بسرعة ٦٠ ميلًا في الساعة، وتبعد عن نقطة الانطلاق بمسافة ٣٠ ميلًا، فمنذ متى انطلقت السيارة؟ تقاس «السرعة» مباشرة من الانزياح نحو الأحمر، وهو عبارة عن تمدُّد للضوء ناتج عن تمدُّد الكون. وهذا الانزياح ليس تأثير دوبلر على الرغم ممَّا قد تذكره بعض الروايات؛ لأنه لا يقيس السرعة عبر الفضاء، بل يقيس السرعة التي يتمدَّد بها الفضاء نفسه، حاملًا المجرات خلال مسيرته. يصعب قياس المسافات إلى المجرات، ويعتمد القياس على معرفة (أو تخمين) عدة عناصر، مثل مدى لمعان المجرات حتى يمكن تقدير المسافة من مقدار الإعتام الذي تبدو عليه لنا؛ مثل قياس المسافة إلى نهاية الشارع عن طريق قياس مدى ضعف الضوء المنبعث من أحد مصابيح الشارع. ويتم التعبير عن العلاقة بين السرعة والمسافة من خلال عدد يسمَّى ثابت هابل، أو ثابت H. كلما ازداد ثابت H، زادت سرعة تمدُّد الكون، وقل الزمن الذي مر منذ الانفجار العظيم.



التلسكوب الراديوي الذي استخدمه بنزياس وويلسون لاكتشاف إشعاع الخلفية الكوني الميكروي. (وكالة ناسا).

عندما بدأتُ حياتي المهنية في ستينيات القرن العشرين باعتباري عالم فلك، كانت صعوبة حساب المسافات إلى المجرات (مقياس المسافة) تعني أن أفضل ما يمكن أن يستنتجه علماء الفلك أن قيمة ثابت H ينبغي أن تتراوح بين ٥٠ و١٠٠، وربما تكون حوالي ٧٥. عندما يكون الثابت ١٠٠، فهذا يعني أن عمر الكون أقل من ٩ مليارات عام بقليل، بينما يشير ثابت ٥٠ إلى أن عمر الكون ضعف القيمة الأولى؛ أي نحو ١٨ مليار عام. غير أن علماء الفيزياء الفلكية كانوا يعكفون على نحو منفرد تمامًا على تطوير تقنيات لتقدير أعمار النجوم، واكتشفوا أن أقدم النجوم المعروفة يتجاوز عمرها ٩ مليارات سنة بكثير، ما جعل أعلى قيمة اقترحها علماء الكونيات لثابت H مستحيلة.

على مدى العقود القليلة التالية، تحدَّدت قيمة ثابت هابل بمزيد من الدقة بفضل عمليات قياس مطوَّرة قائمة على الأسلوب التقليدي، تُوجت بدراسات أُجريت باستخدام تلسكوب هابل الفضائي، لتصبح ٧٢ ± ٨ (أي ما بين ٦٤ و٨٠)، وكان ذلك في عام ٢٠٠١. ولكن في الوقت نفسه، تمكَّن أسلوب مختلف تمامًا يستخدم رصد إشعاع الخلفية الكوني الميكروي من فهم وتوضيح ثابت هابل.

عندما تعرَّف علماء الفلك على إشعاع الخلفية لأول مرة وقاسُوا درجة حرارته، اكتشفوا أن درجة الحرارة واحدة في كل مكان رصدوه؛ أي إن درجة حرارة السماء واحدة في كل الاتجاهات. وهذا يتطابق مع أبسط تنبؤات الحسابات الكونية الخاصة بالانفجار العظيم، ويؤكِّد، من بين أشياء أخرى، أننا لا نعيش في مكان خاص في الكون؛ إذ إن هذا النوع من النمط (أو بالأحرى غياب النمط) من شأنه أن يبدو بالشكل نفسه من أي مكان في الكون. ولكن مع تحسُّن قياساتهم وعدم اكتشاف نمط محدَّد، بدأ هذا في إثارة هاجس مزعج من القلق في أذهان علماء الكونيات. لقد وصفت تلك الحسابات الكونية الشديدة البساطة، في الواقع، سلوك التمدُّد الموحَّد للزمكان من دون أي صعوبة. يحتوي الكون الفعلي على مجرات من النجوم، ولا بد أن هذه المجرات قد نشأت من أشكال غير منتظمة كانت موجودة منذ زمن طويل حينما كان الكون عبارة عن كرة نار ملتهبة، وكان إشعاع الخلفية أشد وأقوى بكثير. حينذاك، كانت كرة النار تحتوي على بحر من الإلكترونات والبروتونات والجسيمات المشحونة بالكهرباء التي تتفاعل مع الإشعاع الكهرومغناطيسي لكرة النار، ومِن ثَم اعتمدت درجة حرارتها في أي بقعة منها على كثافة المادة في ذلك الموقع. بعد ذلك، عندما انخفضت درجة حرارة الكون إلى بضعة آلاف درجة (أي نفس درجة حرارة سطح الشمس في الوقت الحاضر تقريبًا، ولكن في كل أرجاء الكون)، احتُجِزت البروتونات والإلكترونات في ذرات متعادلة كهربيًّا، ومِن

ثَم «انفصل» الإشعاع. ظل الكون متأثرًا بتلك التقلُّبات البدائية، ولكنه لم يَعُد يتفاعل بقوة مع المادة بسبب استمرار انخفاض درجة الحرارة حتى وصلت إلى ٢٫٧ درجة كلفن.

لا بد أن تلك الأشكال غير المنتظمة الأولية تركت أثرًا على درجة الحرارة من أجزاء مختلفة في السماء، كان من الممكن اكتشافها اليوم لو توافرت أدوات ذات حساسية كافية لقياسها. ولكن كان سينبغي أن تكون «شديدة» الحساسية. ومن خلال العمل بترتيب عكسي ابتداءً من قياسات أحجام المجرات وعناقيد المجرات اليوم، تمكَّن علماء الفلك من حساب مدى التفاوت في الكون بعد الانفجار العظيم مباشرة، في وقت الانفصال. وكان هذا يعني أنهم عرفوا حجم التقلُّبات في درجة حرارة إشعاع الخلفية من مكان إلى مكان حينذاك؛ ومِن ثَم استطاعوا معاودة العمل بترتيب طبيعي مرة أخرى لحساب كم يجب أن يكون حجم الاختلافات اليوم في درجة الحرارة من جزء ما من السماء إلى آخر. وتبيَّن أنه جزء من ١٠٠ ألف. وبناءً على أن متوسط درجة الحرارة يبلغ ٢٫٧ درجة كلفن، كان هذا يعني أنه تعيَّن على الأدوات أن تكتشف تقلُّبات قدرها ٠٫٠٠٠٠٣ درجة كلفن، أي ٣٠ جزءًا من المليون من درجة.

كان هذا مستبعدًا؛ فهذه القياسات التي أُجريت بتلك الدقة أُجريت باستخدام قمر صناعي يسمَّى مستكشف الخلفية الكونية (COBE)، أطلقته وكالة ناسا في نوفمبر عام ١٩٨٩. وبعدها مباشرة تمكَّنت الأجهزة في القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية من قياس متوسط درجة حرارة إشعاع الخلفية بدقة أكبر من أي وقت مضى، وكانت النتيجة ٢٫٧٢٥ درجة كلفن، وأُعلن عنها في الاجتماع الذي عقدته الجمعية الفلكية الأمريكية في يناير ١٩٩٠. ولكن هذه كانت مجرَّد البداية. فعلى مدى أكثر من عام، فحصت الأجهزة على متن القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية السماء بأكملها باستخدام ثلاثة أجهزة كشف منفصلة. التقطت الأجهزة ٧٠ مليون قياس منفصل لدرجات الحرارة، وهو ما اضطر الفريق المسئول عن البعثة حينذاك إلى تحليلها، بطرح متوسط درجة الحرارة من أجل رسم خريطة أوضحت الفروق الدقيقة في درجة الحرارة من بقعة في السماء إلى بقعة أخرى. اكتملت الخريطة في عام ١٩٩٢، وكشفت عن وجود تموُّجات في إشعاع الخلفية مع وجود بقع في السماء تزيد درجة حرارتها عن المتوسط بمقدار ٣٠ جزءًا من المليون، وبقع أخرى تنخفض درجة حرارتها عن المتوسط بمقدار ٣٠ جزءًا من المليون. لكن تذكَّر أن المتوسط يساوي ٢٫٧٢٥ درجة كلفن فقط؛ ومِن ثَم فإن «البرودة» و«السخونة» ما هما إلا

مصطلحان نسبيان. وقد اكتُشفت آثار لأشكال غير منتظمة تحوَّلت تحت تأثير الجاذبية إلى مجرات، ما يمثِّل دليلًا آخر يدعم فكرة الانفجار العظيم. ولكن هذا وحده لم يقدِّم قياسًا مستقلًّا دقيقًا لعمر الكون.

وانطلاقًا من نجاح القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية، شرع علماء الفلك في استخلاص مزيد من المعلومات من إشعاع الخلفية. وانطوى ذلك على البحث عن آثار ما يسمَّى ﺑ «الذبذبات الصوتية الباريونية»، وهو المعنى الاصطلاحي للموجات الصوتية، وهي عبارة عن موجات صوتية في الكون الأولي تركت بصمة في إشعاع الخلفية ربما تكون قابلة للاكتشاف اليوم.[٣] هذه التموُّجات الثانوية أصغر وأصعب في الاكتشاف من التموُّجات التي اكتشفها القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية، ولكنها تحمل معلومات إضافية تستحق عناء البحث عنها. يعتمد النمط الدقيق الذي كوَّنته هذه التموُّجات على توازن بين قوى الجاذبية التي تجذب سحب الغاز الضخمة معًا، وبين تأثير جسيمات الضوء السريعة الحركة (الفوتونات) لإشعاع الخلفية خلال فترة قصيرة من الزمن — حوالي ١٠٠ ألف عام — بعد الانفصال مباشرة. وقد أدَّى هذا إلى صقل أسطح الأشكال غير المنتظمة. يزداد حجم بعض الأطوال الموجية خلال هذه الفترة الفاصلة، بينما يختفي بعضها الآخر. وكل هذا يحدث في الكون المتمدِّد، ما يؤدِّي إلى كل من خفض درجة حرارة الفوتونات (ما يقلِّص طاقتها ويقلِّل تأثيرها) وإطالة الموجات الصوتية؛ ومِن ثَم تدخل أيضًا السرعة التي يتمدَّد بها الكون التي تعتمد على ثابت هابل في حيِّز الاعتبار.

والنتيجة هي مزيج فوضوي من الأطوال الموجية، ولكن علماء الفلك معتادون على التعامل مع مثل تلك المزائج ولديهم أداة قوية تسمَّى تحليل طيف الطاقة، يمكنها التقاط الأطوال الموجية الفردية التي تُسهم في تلك الصورة الكلية الفوضوية. يشبه ذلك تحليل الأصوات التي تصدرها فرقة سيمفونية في مزيج صوتي واحد، ثم معرفة الأصوات الفردية التي تصدر عن آلات الكمان والناي وآلات النقر وجميع الآلات الأخرى. ثمة تشبيه آخر وهو تحليل الصوت الصادر من آلة الأرغن ذات الأنابيب لمعرفة أطوال أنابيب الأرغن وغيرها من تفاصيل بنية الآلة.

ينتج عن تحليل طيف الطاقة لنمط تقلُّبات درجة الحرارة في إشعاع الخلفية عبر السماء مخطط بياني متموِّج، يسمَّى (وهي تسمية منطقية للغاية) طيف الطاقة، به نقطة ذروة كبيرة على المنحنى جهة اليسار، وسلسلة من التموُّجات تصغر تدريجيًّا كلما اتجهت نحو اليمين. تُوفِّر الارتفاعات النسبية لنقاط الذروة في المخطط البياني بيانات كثيرة

(ليس عن الموجات الصوتية الباريونية فحسب، على الرغم من أهميتها الخاصة) تكشف معلومات عن العديد من سمات الكون، من بينها سرعة تمدُّده، ومِن ثَم قيمة ثابت H وعمر الكون. أهم ما ينبغي تذكُّره هو أن هذا القياس مستقل تمامًا عن الأسلوب التقليدي القائم على قياس المسافات إلى المجرات.

خضع طيف الطاقة في إشعاع الخلفية الميكروي إلى الدراسة باستخدام قمرَين صناعيَّين في العقود الأولى من القرن الحادي والعشرين. كان الأول هو مسبار ويلكينسون لقياس تباين خواص الموجات الميكروية من وكالة ناسا (المعروف باسم WMAP) الذي أُطلق في صيف عام ٢٠٠١. كانت حساسية أجهزة الكشف على متن مسبار ويلكينسون لقياس تباين الموجات الميكروية تفوق حساسية أجهزة الكشف على متن القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية بمقدار ٤٥ ضعفًا، واستطاعت قياس درجة الحرارة من بقع منفردة في السماء عرضها نحو واحد على خمسة من الدرجة؛ أي ثلث حجم البدر حين يُرى من الأرض اليوم. ظل المسبار يعمل حتى عام ٢٠١٠ حينما نُقل إلى مدار انتظار كي يُفسح المجال أمام أي أقمار صناعية مستقبلية، وأُوقِف عن العمل. من بين البيانات الوفيرة التي حصل عليها المسبار (التي سنتناول بعضها في الاحتمال المستبعد الثالث)، قاس في البداية ثابت هابل، وكانت قيمته ٧٢ ± ٥، وهو ما يتطابق مع عمر الكون (منذ الانفجار العظيم) الذي يبلغ ١٣٫٤ ± ٠٫٣ مليار سنة. مع مرور الوقت وجمع مزيد من البيانات، وفي ذلك المشاهدات التي رصدتها الأجهزة المحمولة على بالونات تطير على ارتفاعات شاهقة، قُدر عمر الكون بمزيد من الدقة وتزحزح قليلًا ليصبح ١٣٫٧٧٢ ± ٠٫٠٥٩ مليار سنة. ولكن في الوقت الذي توقَّف فيه مسبار ويلكينسون عن العمل ووُضع في مدار الانتظار، كان قمر صناعي آخر، وهو مسبار بلانك التابع لوكالة الفضاء الأوروبية، يتولَّى المسئولية بدلًا منه.

أُطلق مسبار بلانك في مايو عام ٢٠٠٩. ونظرًا لحساسيته التي تفوق حساسية مسبار ويلكينسون بثلاث مرات، استطاعت الأجهزة قياس الفروق في درجات الحرارة من بقعة في السماء إلى بقعة أخرى، وكانت فروقًا بلغت نحو واحد على مليون من الدرجة، بينما كان حجم البقع التي قيست حرارتها لا تزيد على واحد على عشرين من الدرجة عرضًا. توقَّف وفكِّر في ذلك. من السهل الجدل بشأن مصطلحات مثل واحد على مليون من الدرجة. لكن في العَقد الثاني من القرن الحادي والعشرين، استطاع علماء الفلك دراسة بقعة في السماء يبلغ حجمها سُدس حجم البدر الظاهر من الأرض، وتحديد درجة حرارتها بالنسبة إلى البقع المجاورة لها «بدقة تبلغ واحد على مليون من الدرجة». إن لم يتحيَّر عقلك بتلك المعلومة، فلن يُحيِّره أي شيء آخر.

واصل مسبار بلانك العمل حتى عام ٢٠١٣، حين تبع مسبار ويلكينسون إلى مدار الانتظار. وفي شهر مارس من ذلك العام، قُبيل خروج القمر الصناعي من الخدمة، أُعلن عن أول نتائج تفصيلية تُوصِّل إليها عن طريق مسبار بلانك، والتي أشارت إلى أن عمر الكون ١٣٫٨١٩ مليار سنة. وبعد عامَين، ومن خلال تحليل مزيد من البيانات، راجع فريق عمل مسبار بلانك تقديرهم ليصبح ١٣٫٧٩٩ ± ٠٫٠٢١ مليار سنة وقيمة ٦٧٫٧٤ ± ٠٫٥ لثابت هابل. وهذه النتيجة ليست قريبة من العدد الذي توصَّل إليه مسبار ويلكينسون فحسب، بل إن كلا القمرَين الصناعيَّين يعطي قيمًا في نطاق ٧٢ ± ٨ التي أشار إليها مستخدمو الأسلوب التقليدي في عام ٢٠٠١. وفي أقل من ٦٠ عامًا، انتقل علماء الفلك من الجدل حول ما إذا كانت قيمة H تساوي ٥٠ أم ١٠٠ — المكافئَين لعمر ١٨ مليارًا أو ٩ مليارات سنة — إلى الجدل حول فرق في الخانة العشرية الثانية! وذلك الفرق بين القياسات التي أجراها مسبار ويلكينسون ومسبار بلانك لا يزيد على ١٠٠ مليون سنة من ١٤ «مليار» سنة تقريبًا، أي أقل من ١ بالمائة.

يُعَد هذا أحد أعظم إنجازات العلم وأكثرها استبعادًا. فمن شأن أي عالِم من جيل سابق — فضلًا عن الشخص العادي — أن يصاب بالذهول حين يعلم أننا نعرف أن عمر الكون في حدود ١ بالمائة، وأن عمره ١٣٫٨ مليار سنة، يزيد مائة مليون أو ينقص. ولكن حتى هذه ليست نهاية القصة. فلا يزال هناك أمور أخرى جيدة.

ذكرت سابقًا أن ثمة مخاوف أُثيرت في ستينيات القرن العشرين (وحتى بعد ذلك بقليل) عندما جاءت بعض تقديرات عمر الكون أقل من تقديرات عمر بعض النجوم. لا حاجة إلى هذا القلق الآن. فبينما كان علماء الكونيات مشغولين بتنقيح تقديراتهم لعمر الكون، كان علماء الفيزياء الفلكية أيضًا مشغولين بتنقيح قياساتهم لأعمار النجوم. وجاءت النتائج مرضية للغاية.

توجد الآن عدة طرق مختلفة لقياس أعمار النجوم، ولكني سأذكر اثنتَين منها فقط بإيجاز؛ كي أُبرز مدى فهم علماء الفلك للكون في الوقت الحاضر. تعتمد الطريقة الأولى على الاكتشاف الذي تمَّ في أوائل القرن العشرين، عن مدى ارتباط درجة حرارة نجم ما (والتي ترتبط بلونه) بدرجة سطوعه. في أي مخطط بياني يُوضِّح السطوع على المحور الرأسي ودرجة الحرارة في ترتيب تنازلي من اليمين إلى اليسار على المحور الأفقي، تقع معظم النجوم على خط ممتد من أعلى اليسار (ساخن وساطع) إلى أسفل اليمين (بارد ومعتم). فالسطوع الظاهر للنجم يعتمد على بعده؛ ومِن ثَم يُحسب السطوع بناءً على

الشكل الذي يظهر عليه من مسافة ٣٢,٥ سنة ضوئية (أي ١٠ فراسخ فلكية، بالوحدات التي يفضلها علماء الفلك). وهذا بدوره يعتمد على معرفة المسافات إلى النجوم، وهذا هو السبب وراء عدم اكتشاف هذه العلاقة بعد فترة وجيزة (الطريقة التي يقيس بها علماء الفلك المسافات إلى النجوم قصة أخرى بمفردها). يطلق على التمثيل البياني اسم مخطط هرتزبرونج-راسل، نسبة إلى عالمَي الفلك اللذَين اكتشفا هذه العلاقة، كلٌّ بمفرده. ونظرًا لأن معظم النجوم الساطعة تقع أعلى اليسار متجهة إلى الخط أسفل اليمين، يطلَق على هذا المخطط النسق الأساسي. ولكن توجد أعداد أقل من النجوم تقع أسفل الخط المتجه إلى اليسار (معتمة لكن ساخنة) وفوق الخط المتجه إلى اليمين (ساطعة لكن باردة).

يعتمد موقع النجم على النسق الأساسي على كتلته فحسب. فكلما زادت كتلة النجم؛ زاد اضطراره للإسراع أكثر في حرق الوقود النووي في قلبه كي يصمد في مواجهة وزنه، ومِن ثَم يطلِق مزيدًا من الطاقة ويكون شديد السطوع. لكن عندما يستنفد الوقود النووي بداخله، تنتفخ المناطق الخارجية من النجم، ومِن ثَم تتسع المساحة التي تمر فيها الحرارة ما يجعل السطح باردًا. يتحوَّل النجم إلى جسم ضخم أحمر في أعلى اليمين من مخطط هرتزبرونج-راسل. وعندما يُستهلك كل الوقود، يتحوَّل إلى جمرة نجمية (قزم أبيض)، ومِن ثَم يتقلَّص ويظهر أسفل اليسار من المخطط. لكن النقطة الأساسية هنا أن الزمن في حياة النجم عندما يحدث هذا يعتمد على كتلته. فبالنسبة إلى مجموعة من النجوم في عمر واحد، يظل النسق الأساسي يقصر كأن الخط يُمحى بداية من أعلى اليسار. هناك تعبير خالد في هذا الإطار يقول: «النجوم الكبيرة سريعة الإيقاع وتموت صغيرة.» لقد أصبحنا نستوعب العلاقة بين الكتلة ودرجة الحرارة في نجوم النسق الأساسي جيدًا؛ لأن الشيء الذي يدعم النجم ويساعده على الصمود، أيما كان، لا بد أن ينتج الحرارة الكافية تمامًا لمنعه من السقوط. فإنتاج قدر بالغ من الحرارة من شأنه أن يتسبَّب في انفجار النجم، وإنتاج قدر ضئيل للغاية يؤدِّي إلى انكماشه. لذا توضِّح لنا النقطة التي ينتهي عندها النسق الأساسي كتلة النجوم الأقدم في تلك المجموعة، وهذا بدوره يوضِّح عمرها؛ لأننا نعرف المدة التي تستغرقها النجوم على اختلاف كتلتها لتستهلك الوقود النووي بداخلها (وهو ما يحدث بالأساس عن طريق تحويل الهيدروجين إلى هليوم).

بجمع كل هذه البيانات معًا، يتضح أنه إذا كان لدينا مجموعة من النجوم كلها في عمر واحد ويمكننا قياس المسافة إليها، بالإضافة إلى إمكانية تحديد النهاية العليا لنسقها الأساسي، إذن يمكننا معرفة عمر مجموعة النجوم. ولحسن الحظ، فإن مثل تلك المجموعات

موجودة، ويطلَق عليها العناقيد النجمية الكروية. هذه العناقيد هي عبارة عن كرات من النجوم تضم مئات الآلاف من النجوم الفردية. تكوَّنت النجوم جميعًا في كل عنقود بعد الانفجار العظيم بفترة ليست ببعيدة في المناطق الخارجية لسحابة الغازات الأولية التي تكوَّنت من رحمها مجرتنا (تظهر عناقيد مماثلة حول المجرات الأخرى). ولسوء الحظ، يصعب حساب المسافات إلى تلك العناقيد إلى حدٍّ بعيد. لكن على الأقل تخبرنا الفيزياء العادية بأعمار النجوم ذات الكتل المختلفة. ومع كل الصعوبات التي ينطوي عليها الأمر، كان كل ما استطاع أن يخبرنا به علماء الفيزياء الفلكية، حتى قُبيل منتصف التسعينيات من القرن العشرين، عن أعمار العناقيد النجمية الكروية أنها لا بد أن تتراوح بين ١٢ و١٨ مليار سنة. كان هذا التخمين على الأقل يدور في نفس نطاق التقديرات الخاصة بعمر الكون، لكنها مبهمة على نحو محبط. ولكن بعد ذلك جاء القمر الصناعي هيباركوس التابع لوكالة الفضاء الأوروبية.

أُطلق القمر الصناعي هيباركوس في عام ١٩٨٩، وأجرى قياسات دقيقة للمسافات لِمَا يقرب من ١٢٠٠٠٠ نجم باستخدام طريقة الإزاحة البصرية أو التخاطل؛ أي التحوُّل الظاهر في مواقع النجوم في السماء عند قياسها من الجوانب المقابلة لمدار الأرض. وصف فريق العمل دقة القياسات بأنها مشابهة لاستخدام تلسكوب من أعلى برج إيفل لقياس حجم كرة جولف أعلى مبنى إمباير ستيت. وبالجمع بين بيانات القمر الصناعي هيباركوس وطرق القياس الأخرى لأعمار العناقيد النجمية الكروية، توصَّل براين تشابوير وبالتعاون مع آخرين من أعضاء فريق هيباركوس، وذلك مع نهاية تسعينيات القرن العشرين، إلى أفضل تقدير لأعمار أقدم العناقيد النجمية الكروية وهو ١٢٫٦ مليار سنة قد يزيد مليار سنة أخرى أو ينقص. وتشير البيانات التي جمعها القمر الصناعي جايا، الذي أُطلق لاحقًا في أواخر عام ٢٠١٣، إلى أن العدد أعلى بقليل، لكنه يظل أقل من ١٣٫٨ مليار سنة.

الأسلوب الثاني الذي أريد أن أتناوله بسيط للغاية عمليًّا، ولكن يواجه المراقبون صعوبة بالغة في تطبيقه. يعتمد هذا الأسلوب على طريقة «تحلُّل» العناصر الإشعاعية لإنتاج مزيج من العناصر المختلفة. فُهمت هذه العملية جيدًا من الدراسات التي أُجريت على الأرض، وتُستخدم على نطاق واسع لتقدير أعمار الصخور. يُعتبر اليورانيوم ٢٣٨ أحد تلك العناصر الإشعاعية المفيدة، وفي أي عينة من اليورانيوم ٢٣٨، تتحلَّل نصف الذرات في غضون ٤٫٥ مليار سنة (وهو ما يعادل عمر الأرض تقريبًا)، ويتحلَّل النصف المتبقي في الـ ٤٫٥ مليار سنة التالية، وهلم جرًّا. يمكن معرفة عمر أي شيء يحتوي على اليورانيوم

٢٣٨ عن طريق قياس كمية اليورانيوم ٢٣٨ التي يحتوي عليها في الوقت الراهن ومقارنتها بكميات «نواتج التحلُّل» المختلفة التي توضِّح لنا الكمية التي بدأت بها. كان «كل» ما على علماء الفلك القيام به هو العثور على نجم يحتوي في غلافه على عنصر اليورانيوم ٢٣٨ وقياس كميته، وكذلك كمية العناصر المتحلِّلة باستخدام التحليل الطيفي، الذي يُعَد أقوى أداة في علم الفلك.[٤] هذا الجزء هو الأصعب، ولكنه استُخدم بالفعل مع بضعة نجوم وفي ذلك نجم أحمر عملاق يسمَّى HS 1523-0901 الذي يبعد عن الأرض مسافة ٧٥٠٠ سنة ضوئية في اتجاه كوكبة الميزان. يبلغ عمر هذا النجم ١٣٫٢ مليار سنة — يزيد ٣ مليارات سنة أو ينقص — حسب تقارير أنَّا فريبيل عام ٢٠٠٧.

على الرغم من الشكوك المتبقية في التقديرات الفيزيائية الفلكية، فإن كل شيء يتطابق مع تقدير العمر الكوني. وهذه حقيقة أكثر ترسُّخًا ممَّا قد تعتقد للوهلة الأولى. يتحدَّد العمر الكوني للكون من الفيزياء ذات النطاق الواسع (النظرية العامة للنسبية في الغالب). بينما يتحدَّد العمر الفيزيائي الفلكي للكون من الفيزياء ذات النطاق الضيق نسبيًّا لآلية عمل النجوم دون النظر إلى النظرية العامة مطلقًا. ومع ذلك، لم تتغيَّر النتائج في الطريقتَين. من الواضح أن العلم يؤتي ثماره! لقد اعتبر علماء الفيزياء أنهم يستحقون الثناء. ولكن لا يمكنهم الركون إلى أمجادهم؛ لأنه في بداية العشرينيات من القرن الحادي والعشرين، يبدو أن هناك ما يكدِّر تلك الأمجاد. هناك فرق بسيط — لكن ربما كان بالغ الأهمية — بين تقديرات قيم ثابت هابل التي وُضعت باستخدام الأساليب التقليدية والقيم التي وُضعت من خلال دراسة إشعاع الخلفية، التي يبدو أنها أكثر إثارة للقلق؛ نظرًا لانخفاض «مجالات الخطأ» في القياس التقليدي. يُصر أنصار كل طريقة قياس على أن الأرقام التي توصَّلوا إليها دقيقة. لكن في النهاية، لا تسير كل الأمور منسجمة بعضها مع بعض تمام الانسجام. وفي هذا الصدد يستخدم علماء الكونيات مصطلح «شد وجذب» لوصف المشكلة القائمة بين المعسكرَين، مفضِّلين عدم استخدام كلمة «خلاف». لكن ينبغي للفيزيائيين أن يُرحِّبوا بهذا النوع من التكدير؛ لأنه يفتح الطريق إلى اكتشافات جديدة. وربما كان له علاقة بالقصة التالية التي سأرويها.

هوامش

(١) كثيرًا ما يقال إنه كان يقصد من هذا المصطلح السخرية. ولكنه أخبرني أنه كان فقط يبحث عن مصطلح جذاب مضاد لتعبير الحالة الثابتة.

(٢) نطلق على هذه الكثافة اسم الانفجار العظيم؛ لأننا نفهم تمامًا فيزياء المادة التي لها مثل تلك الكثافات، وكل شيء منذ ذلك الحين جيد. إن كيفية نشأة تلك الكرة النارية الحارة والكثيفة (ما حدث قبل الانفجار العظيم) قائمة أكثر على التخمينات والافتراضات، ولكني سأتناول أفضل تفسير لها بعد قليل.

(٣) «الباريون» هو مجرَّد مصطلح عام لأشياء مثل الذرات؛ أي شيء يتألَّف من إلكترونات وبروتونات ونيوترونات.

(٤) تناولتُ هذه الأداة على نحوٍ وافٍ في كتابي «سبعة أعمدة للعلم».

الاحتمال المستبعد الثالث:
تمدُّد الكون في تسارع

ما الذي كان قبل الانفجار العظيم؟ كيف بدأ الكون؟ كيف سينتهي؟ على غير المتوقَّع، تتوافر لدينا إجابات جزئية على كل هذه الأسئلة. وكلها مرتبطة بخاصية بالغة الأهمية للكون، ألَا وهي الكثافة.

يمكن لمعادلات النظرية العامة في النسبية أن تسير بطريقة عكسية أو بطريقة طبيعية كي توضِّح لنا متى بدأ الكون وما مصيره. بالنظر إلى الماضي، تشير تلك المعادلات إلى أن الزمان والمكان كانت لهما بداية، حين انبثق كل شيء يمكننا اكتشافه في الكون المتمدِّد من نقطة صفر حجم والكثافة اللامتناهية؛ أي التفرُّد في «الزمن الصفري». لا يؤمن علماء الفيزياء بحدوث ذلك فعليًّا؛ لأن تأثيرات الكم لا تسمح بوجود مثل تلك الأشياء. لكنهم يتقبَّلون فكرة حدوث شيء أدَّى إلى خلق منطقة ذات كثافة هائلة في حجم صغير تطوَّر إلى الانفجار العظيم. إذا تقبَّلنا فكرة أن الانفجار العظيم هو الوقت حينما كان الكون بأكمله بكثافة نواة ذرية، وهي القاعدة العامة المألوفة، إذن فقد استغرق مدة تساوي واحدًا على عشرة آلاف من الثانية بعد بداية الزمن، وبعد نصف ساعة من بداية الزمن كانت درجة الحرارة لا تزال ٣٠٠ مليون درجة كلفن؛ أي ضعف درجة حرارة قلب الشمس عشرين مرة. كل ما حدث للمادة منذ أول جزء على عشرة آلاف من الثانية تشرحه الفيزياء الواضحة السهلة الفهم. لكن ذلك الجزء الأول من الثانية بالغ الأهمية لفهم ما حدث بعد ذلك. كما أنه مرتبط ارتباطًا وثيقًا بلغز عميق عن كثافة الكون اليوم.

على الرغم من تمدُّد الكون، تحاول الجاذبية إبطاء هذا التمدُّد وإعادة كل شيء بعضه إلى بعض مجدَّدًا. وبدا ذلك يشير إلى بضعة احتمالات بسيطة حتى نحو عشرين سنة مضت.

يعتمد نجاح الجاذبية في التغلُّب على التمدُّد على سرعة الكون في التمدُّد ومقدار المادة التي يحويها؛ أي كثافته. فإذا كانت الكثافة منخفضة كثيرًا، ستكون الجاذبية أضعف من أن توقف التمدُّد، ومِن ثَم سيستمر للأبد. أمَّا إذا كانت الكثافة عالية للغاية، فستكون الغلبة للجاذبية، وسيتوقَّف الكون عن التمدُّد ويبدأ في الانهيار مرة أخرى ليعود إلى نقطة التفرُّد. وثمة حالة خاصة وفريدة، هي تلك التي تسمَّى الكثافة الحرجة، يتباطأ فيها التمدُّد أكثر فأكثر، ولكنه لا يتوقَّف أبدًا. ولكن تبيَّن أن القصة لا تنتهي عند هذا الحد.

حسبما أوضح أينشتاين، توجد علاقة بين الكتلة وطريقة انحناء المكان والزمان. وبلغة النظرية العامة، يقال على نموذج الكون ذي التمدُّد المتواصل مفتوحًا، وعلى النموذج المنهار مغلقًا، وعلى نموذج الكثافة الحرجة مسطَّحًا. الأمر الغريب بشأن الكون الذي نعيش فيه أنه، كما يمكننا القول، مسطَّح بالفعل. ما وجه الغرابة في ذلك؟ يكمن السبب فيما يشير إليه ذلك عن الظروف المحيطة في الوقت الذي وقع فيه الانفجار العظيم، ولأن التسطُّح المطلق هو أقل الاحتمالات ترجيحًا، ما يتطلَّب موالفة الأفكار بدقة بناءً على مقياس عقلي محيِّر.

تتحدَّد الكثافة برقم يسمَّى معامل الكثافة، تساوي قيمته ١، ويتساوى مع قيمة الكثافة الحرجة، حيث تنتسب الأعداد الأصغر إلى العدد اللانهائي من احتمالات الفضاء المفتوح، والأعداد الأكبر إلى العدد اللانهائي من احتمالات الفضاء المغلق. وحتى قبل ظهور الأقمار الصناعية التي درست إشعاع الخلفية، كان علماء الفلك يعلمون أن معامل الكثافة اليوم تتراوح قيمته حتمًا بين ٠٫١ و١٠، وذلك ببساطة عن طريق حساب عدد المجرَّات التي تُرى في حجم الفضاء الذي يمكننا رصده. يبدو هذا نطاقًا كبيرًا. ولكن المعامل تغيَّر مع تمدُّد الكون منذ الانفجار العظيم بسبب تغيُّر التوازن بين الكثافة ومعدَّل التمدُّد؛ إذ قلَّت قيمة كلَيهما ولكن بمعدَّلات مختلفة. ونتيجة لذلك، ظلَّت الطريقة التي تمدَّد بها الكون منذ الانفجار العظيم تجذبه بعيدًا عن الكثافة الحرجة. ولكي يتراوح معامل الكثافة بين ٠٫١ و١٠ في الوقت الحاضر، كان لزامًا أن يساوي بالضبط ١، بدقة تقارب جزءًا واحدًا في $١٠^{٦٠}$ وقت الانفجار العظيم. وزادت بيانات القمر الصناعي الأمور تعقيدًا، من خلال ما كشفت عنه تلك البيانات من أن معامل التسطُّح يقارب ١ على نحو غير مفهوم، حتى في الوقت الحاضر؛ ومِن ثَم لا بد أنه كان دومًا يقترب من ١، أو لم يكن كذلك على الدوام. أي كان كذلك «فقط» منذ الجزء الأول من عشرة آلاف جزء من الثانية. وفي ذلك الجزء الصغير من الثانية، يكمن تفسير هذه السمة غير المحتملة للكون.

وكما أشرت سابقًا، أصبحت تأثيرات فيزياء الكم مهمَّة للكون بأكمله في المدة بين الزمن الصفري والانفجار العظيم. وهذا يوضِّح لنا، من بين أشياء أخرى، أن الزمن له كم، وهو أصغر قدر ممكن من الزمن يمكن أن نحصل عليه. وهذا القدر يساوي $١٠^{-٤٣}$ ثوانٍ. إن تمدُّد الكون لم يبدأ من نقطة التفرُّد عند بداية الزمن (ز = صفر)، بل بدأ في ذلك الوقت، ز = $١٠^{-٤٣}$ ثوانٍ، من بذرة لا يزيد حجمها عرضًا على ما يطلق عليه طول بلانك ($١٠^{-٣٥}$ م) وقت أن كانت الكثافة غير مطلقة، بل «فقط» تساوي نحو $١٠^{٩٤}$ جرامات لكل سنتيمتر مكعب.[١] وتلك هي القيود المطلقة على الحجم والكثافة المسموح بها في فيزياء الكم. قد يعتقد المرء أن جسمًا بهذا الحجم الصغير والكثافة الضخمة سيتحطم بواسطة الجاذبية ويختفي. لكن في أواخر عام ١٩٧٩، أدرك الفيزيائي الأمريكي آلان جوث أنه ليس بالضرورة أن يحدث ذلك، واكتشف طريقة لرأب الفجوة بين بداية الزمن والانفجار العظيم.

لاحظ جوث أن ثمة عملية كمومية تسمَّى كسر التناظر، وهي عملية تحدث في هذه الظروف القاسية، ربما استطاعت أن تطلق الطاقة في أول جزء من الثانية، ما أحدث اندفاعًا قويًّا إلى الخارج أدَّت إلى تمدُّد الكون بسرعة هائلة، حتى إن الجاذبية لم يُتَح لها الوقت لإيقافه. سرعان ما سكن الاندفاع القوي، ولكنه أحدث الانفجار العظيم وترك الكون يتمدَّد نحو الخارج، ولكن بعد أن أصبح بإمكان الجاذبية أن تبطئ التمدُّد. يشبه إطلاق الطاقة التي ينطوي عليها عملية كسر التناظر الحرارة الكامنة التي تطلقها المياه عندما تتحوَّل من بخار إلى سائل، ولكن تلك الطاقة أشد بكثير. في بداية الزمن، أخذت هذه العملية كل مساحة دقيقة في الفضاء — أصغر من البروتون بكثير — وعملت على «تضخيمها» إلى أن أصبحت بحجم كرة السلة. وهذا ما جعل الكون مسطَّحًا.

يمكن رؤية الطريقة التي وقعت بها تلك الأحداث من زاوية أخرى. لقد كان حجم التضخُّم الذي حدث قُبيل الانفجار العظيم يعادل كرة تنس أُخذت ونُفخت حتى أصبحت بحجم الكون الظاهر بأكمله. لا يخفى أن كرة التنس منحنية ومنثنية في شكل كرة. ولكن لو كانت كبيرة مثل الكون الذي نراه من حولنا، كانت أي مخلوقات تتحرَّك على سطحها ستعتقد أنها مسطحة. وعلى النحو نفسه، أدَّى التضخُّم الكوني إلى صعوبة تمييز فضاء الكون عن الفضاء المسطَّح، مع صعوبة تمييز كثافة الكون عن الكثافة الحرجة.

لم تخلُ الجَعبة بعد. في المراحل الأخيرة من التضخُّم، أدَّت التقلُّبات الكمومية لكمية فيما أطلق عليه آلان جوث «الحلقة التمهيدية إلى الانفجار العظيم» إلى تكوُّن أشكال غير

منتظمة متناهية الصغر. نمت هذه الأشكال غير المنتظمة مع التضخُّم وبقيت في صورة أشكال غير منتظمة في الانفجار العظيم، وكانت بمثابة الجذور التي استطاعت المجرات وعناقيد المجرات أن تنبثق منها. فهذا النوع من التقلُّب يخلق نمطًا مميَّزًا من الأشكال غير المنتظمة الصغيرة والكبيرة، وقد أظهرت الأقمار الصناعية هذا النوع من النمط تحديدًا في إشعاع الخلفية. حتى القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية اكتشف هذا النمط، كما أوضح أن الكون مسطَّح، وأكَّد تنبُّؤات نظرية التضخُّم. يحتوي الكون على الكثافة الحرجة للمادة بالضبط. لكن تلك النظرية طرحت لغزًا في تسعينيات القرن العشرين. أين كانت كل المادة التي كانت مطلوبة كي يكون الكون مسطَّحًا؟

بحلول تسعينيات القرن العشرين، أدرك علماء الفلك تمامًا أنه إلى جانب جميع النجوم اللامعة التي يمكننا رؤيتها في مجرة درب التبانة والمجرات الأخرى، لا بد من وجود أشياء لا نراها، أشياء مظلمة لا تلمع من تلقاء نفسها، بل تعلن عن وجودها الخفي بتأثيرها التجاذبي على الطريقة التي تدور بها المجرات وتتحرَّك داخل عناقيد. ولكنهم استغرقوا وقتًا طويلًا حتى تقبَّلوا الأدلة على ذلك.

تُحسَب السرعة التي تتحرَّك بها المجرات إحداها بالنسبة للأخرى داخل العناقيد من نسخة أخرى من الانزياح نحو الأحمر، وهي نسخة مشابهة لتأثير دوبلر الحقيقي هذه المرة، تسبِّبه الحركة عبر الفضاء. كان أول من لفت الانتباه إلى هذا هو فريتز زفيكي، عالم الفلك السويسري المقيم في أمريكا، وذلك في ثلاثينيات القرن العشرين. قد تتجاوز السرعات العشوائية للمجرات الفردية في العنقود الواحد ألف كيلومتر في الثانية، ولا يمنعها من الإفلات من العنقود إلا قوة جاذبية كل المادة الموجودة داخل العنقود. لا بد أن هناك ما هو أكبر من مجرَّد كَمٍّ مُعيَّن من المادة، وإلا أصبحت سرعة الإفلات من العنقود أقل من سرعات المجرات، وتبخَّر العنقود مع هروب المجرات. عندما حاول زفيكي أن يوازن بين المعادلات وجد أن المجرات الساطعة لا تمثِّل سوى جزء صغير من كتلة العنقود العادي. ووجد معظم علماء الفلك أن هذا احتمال مستبعد جدًّا؛ ما جعلهم يتجاهلون النتائج التي توصَّل إليها زفيكي عشرات السنين.

بدأت الأمور تتخذ منحًى مختلفًا في ثمانينيات القرن العشرين بعدما درست عالمة الفلك الأمريكية فيرا روبين مع زملائها الطريقة التي تدور بها المجرات الفردية، وذلك عن طريق قياس سرعات النجوم من خلال تأثير دوبلر، وغير ذلك من السمات من مسافات مختلفة من مركز كل مجرة. وتوقَّعوا أن يرَوا المجرات تدور بالطريقة نفسها التي تدور

بها المجموعة الشمسية، بمعنى أن الأجسام الأقرب للمركز تتحرَّك بسرعة أكبر من الأجسام القريبة من الأطراف. يحدث هذا في المجموعة الشمسية لأن الجزء الأكبر من الكتلة يتركَّز في المركز — أي في الشمس — ومِن ثَم يكون الجذب الذي تستشعره الكواكب الأبعد أضعف. ونظرًا لأن معظم نجوم المجرة وغبارها وغازها يتركَّز في منتصفها، بدا واضحًا أن تلك الأشياء الموجودة على الأطراف لا يفترض أنها تستشعر قدرًا كبيرًا من الجذب، ومِن ثَم يفترض أن تتحرَّك ببطء أكبر من غيرها القريبة من المركز. ولكن فيرا روبين اكتشفت أن المجرات التي تأخذ شكل القرص مثل مجرة درب التبانة تدور بالسرعة نفسها حتى أطراف القرص الساطع المرئي للنجوم. وكان التفسير الوحيد الممكن لذلك هو أن كل مجرة من المجرات كانت في قبضة هالات ضخمة من «المادة المظلمة»، تحوي كتلة تفوق كتلة النجوم الساطعة عشر مرات. وهكذا ثبتت صحة نظرية زفيكي. لكن (ويبدو أن الحديث لا يخلو دائمًا من «لكن») لا يمكن أن تكون هذه هي نهاية القصة.

قد يُعتقَد أن كل هذه المادة المظلمة تكون في شكل غازات وغبار، وتتألَّف من ذرات وجزيئات شأنها شأن أجسام البشر، والمجموعة الشمسية والنجوم الساطعة مثل الشمس، وهي تلك المادة التي يُطلَق عليها المادة الباريونية، والتي تتكوَّن بالكامل من بروتونات ونيوترونات وإلكترونات. في الواقع إن جزءًا من الكتلة اللازمة لمنع المجرات من الإفلات من العناقيد يأتي بالفعل في شكل غاز حار يطلق أشعات سينية تكتشفها الأقمار الصناعية. ولكن هذه ليست القصة كاملة. إن فيزياء الانفجار العظيم الواضحة والمفهومة — وقت أن كانت الظروف قاسية «فقط» مثلما هو الحال داخل أنوية الذرات في الوقت الحاضر — تضع قيدًا صارمًا على عدد الباريونات التي ربما تكون قد شاركت في التفاعلات في أثناء حدوث الانفجار العظيم. وهذا يوضِّح لنا أن كثافة الباريونات في الكون لا تتعدَّى ٥ بالمائة من الكثافة الحرجة اللازمة لجعل الكون مسطَّحًا. وبتطبيق تلك القاعدة العامة على حالة عناقيد المجرات، نجد أن هناك قيدًا على مقدار المادة الباريونية التي يمكن أن يحتوي عليها العنقود الواحد. حتى الكتلة المجمَّعة للغاز والمجرات وأي مادة باريونية أخرى بالمقدار الذي تسمح به هذه القاعدة، تظل أقل بكثير من الكتلة الكلية للعنقود، ممَّا يوضِّح أن ثمة قدرًا كبيرًا من مادة أخرى غير باريونية موجودة حولنا. ولَمَّا كانت تلك المادة باردة ومظلمة، يكون من المنطقي تمامًا أن تُعرف بالمادة الباردة المظلمة. لا أحد يعرف كُنه هذه المادة، ولكن يُشار إليها باسم «المادة الباردة المظلمة» كي يصبح اسمها مألوفًا أكثر. النقطة المهمَّة هي أنها ليست من المادة التي خُلقنا منها، ولا تتفاعل مع المادة الباريونية إلا من خلال

الجاذبية؛ فهي مظلمة؛ لأنها لا تتفاعل مع الضوء أو غيره من الإشعاع الكهرومغناطيسي (مثل موجات الراديو أو الأشعة السينية) على الإطلاق. ولذلك لا تخضع تلك المادة إلى قيود الانفجار العظيم مثل المادة الباريونية، ولكن هذا يجعل اكتشافها بصورة مباشرة أمرًا بالغ الصعوبة، وهذا هو السبب في أننا لا نعرف بعدُ شكل جزيئات المادة الباردة المظلمة.



فيرا روبين (جيتي إيمدجز).

نأتي إلى المعضلة. بحلول منتصف تسعينيات القرن العشرين، أصبح واضحًا أن بتجميع الخيوط معًا، فإن تماسك عناقيد المجرات معًا يعني أن الباريونات يمكن أن تمثِّل حوالي ٥ بالمائة من الكثافة الحرجة، بينما يمكن أن تمثِّل المادة الباردة المظلمة نحو ٢٥ بالمائة منها. ومجموع هاتَين النسبتَين معًا لا يشكِّل أكثر من ٣٠ بالمائة من كثافة الكتلة اللازمة لجعل الكون مسطَّحًا. فأين بقية هذه الكتلة؟ أطلقت القلة من علماء الكونيات الذين انتابهم القلق إزاء هذا الأمر في تسعينيات القرن العشرين على تلك المعضلة معضلة الباريونات. لكن كان ثمة حل لها. وفقًا لما كتبتُه عام ١٩٩٦،[٢] في تلخيصي لما كتبه ديفيد وايت وأندي فابيان، بمعهد علوم الفلك بجامعة كمبريدج: «إذا أراد علماء الكونيات

الاحتفاظ بفكرة أن الكون مسطَّح مكانيًّا، حسبما أكَّدت نظريات التضخُّم الكوني؛ فقد يكون عليهم إعادة تقديم فكرة وجود ثابت كوني». والسبب في ذلك أن الثابت الكوني — شأنه شأن الثابت الذي قدَّمه أينشتاين ثم استبعده عند اكتشاف أن الكون يتمدَّد — يكافئ طاقة، أو مجالًا، تملأ الفضاء وتمنحه نوعًا من المرونة. ربما يكون هذا بمثابة زنبرك مشدود يقاوم تمدُّد الكون ويوقف حركة الأشياء (وهي الطريقة التي فكَّر بها أينشتاين في الأساس في الأمر)، أو بمثابة زنبرك مضغوط يندفع نحو الخارج عكس تأثير الجاذبية، ما يسرع التمدُّد بناءً على القيمة الدقيقة للثابت. يُستخدم الحرف اليوناني لامدا (Λ) للإشارة إلى الثابت الكوني، ويشار إليه في بعض الأحيان بـ «مجال لامدا». ولمَّا كانت الكتلة والطاقة متكافئتَين، فإن مجال لامدا يؤثِّر على درجة انحناء الفضاء. فإذا كان الكون مسطَّحًا ولا يحتوي إلا على ٣٠ بالمائة من المادة اللازمة كي يكون مسطَّحًا في شكل الباريونات والمادة الباردة والمظلمة، فإن هناك مساحة لنسبة ٧٠ بالمائة من الكثافة الحرجة كي تكون في شكل ثابت كوني، أو «طاقة مظلمة» كما صارت معروفة في الوقت الحاضر. في عام ١٩٩٦، كان هذا الاقتراح غامضًا ومستبعدًا ولا يعرفه سوى قلة من علماء الكونيات (وعلى الأقل كاتب واحد في العلوم). وبعد عامَين، أصبح مجال لامدا هو الرائج.

نتجت تلك المعرفة عن اكتشاف حدث عن طريق الصدفة. في أواخر تسعينيات القرن العشرين، كان هناك فريقان من الباحثين يسعَون إلى تحسين أساليب قياس ثابت هابل عن طريق إقحام التكنولوجيا لقياس خصائص النجوم المتفجِّرة المعروفة باسم المستعرات العظمى من النوع 1a، واختصارها SN1a. هذه النجوم نادرة للغاية؛ ففي مجرة مثل درب التبانة لا يوجد أكثر من نجمَين كل ألف سنة أو نحو ذلك. ولكن مع وجود آلاف المجرات الخاضعة للدراسة، فكثيرًا ما تُكتشف تلك النجوم؛ لأن كل نجم من النجوم يسطع بدرجة تماثل سطوع المجرة التي يعيش فيها لفترة وجيزة من الوقت. وتُعَد هذه بمثابة هدية لعلماء الكونيات؛ لأن كل نجم من المستعرات العظمى من النوع 1a يبلغ ذروة السطوع تلك عندما ينفجر. تُعَاير درجة السطوع بدراسة المستعرات العظمى في المجرات القريبة التي توصَّل العلماء إلى مسافاتها بوسائل أخرى. ومِن ثَم عندما ينفجر أحد نجوم المستعرات العظمى من هذا النوع في مجرة بعيدة، توضِّح درجة بُعد سطوعه الظاهر (أو خفوته) كم تبعد تلك المجرة بالضبط. وعندئذٍ، يعطي قياس الانزياح نحو الأحمر للمجرة نفسها علماء الفلك قيمة لثابت هابل.

كان هدف الفريقين هو استخدام تلك التقنية التي حُسب متوسط قيمتها على العديد من المجرات؛ لدراسة المجرات البعيدة والمجرات ذات السطوع الخافت. ونظرًا لأن الضوء

يستغرق وقتًا محدَّدًا للتنقُّل عبر الفضاء، فإننا عندما ننظر إلى المجرات البعيدة، نرى الضوء الذي غادرها منذ وقت طويل — منذ مليارات السنين — عندما كان الكون أصغر عمرًا وأقل حجمًا. وبما أن الجاذبية تحاول عرقلة تمدُّد الكون، توقَّع الباحثون أنه من خلال مقارنة دراساتهم على المجرات الشديدة البعد التي تضم المستعرات العظمى من النوع 1a بدراسات مشابهة أجريت على المجرات القريبة، سيكتشفون السرعة التي كان يتمدَّد بها الكون في الماضي قبل أن تستغرق الجاذبية وقتًا كبيرًا في إبطاء هذا التمدُّد. وما أثار دهشة شديدة لدى الفريقين ما اكتشفوه في عام ١٩٩٨ من أن قياساتهم تدل على أن الكون كان يتمدَّد بسرعة «أبطأ» في الماضي، أو بعبارة أخرى، أن الكون يتمدَّد اليوم أسرع ممَّا كان في الماضي. أي إن تمدُّد الكون يتسارع.

من الجيد أن توصَّل فريقان إلى النتيجة نفسها كلٌّ على حدة، باستخدام أدوات رصد مستقلة تمامًا؛ لأن معظم علماء الفلك رأوا هذا أمرًا مستحيلًا تمامًا، لدرجة أنه لو أن فريقًا واحدًا فقط قد أعلن عن الاكتشاف، لربما اعتُبِر خطأً. وبمقتضى الحال، عُزِي التسارع الغامض إلى ظاهرة الطاقة المظلمة (وهو مجرَّد مصطلح لإخفاء حقيقة أنه لا أحد يعلم ماهية تلك المادة، شأنها في ذلك شأن المادة الباردة المظلمة)، وأمضى المنظِّرون وقتًا حافلًا في محاولة التوصُّل إلى تفسيرات غريبة لتلك الظاهرة.[٣] ولكن لم تكن ثمة حاجة إلى ذلك. فأبسط التفسيرات للطاقة المظلمة وأرجحها كان أمام أعينهم بالفعل. وأعني بذلك مجال لامدا؛ الشكل الحديث للثابت الكوني الذي وضعه أينشتاين. فكما رأينا، يساهم هذا المجال في مرونة الكون؛ إذ يدفعه إلى الخارج، في حين أن الجاذبية تسحبه إلى الداخل. والواقع أن معضلة الباريونات قد تنبَّأت بتسارع التمدُّد؛ لأن مقدار الطاقة المظلمة اللازمة لتفسير نتائج المستعرات العظمى من النوع 1a هو نفسه المقدار المطلوب بالضبط لجعل الكون مسطَّحًا. والطريقة التي يعمل بها مجال لامدا أيضًا تفسِّر أسباب بدء التمدُّد الكوني في التسارع في الآونة الأخيرة فقط (بلغة علم الكونيات).

بصرف النظر عن القيمة الفعلية لمجال لامدا، فإن الخاصية الأساسية له لا تكمن في عدم ثبات القيمة في كل مكان فحسب، بل إنها تبقى ثابتة في كل الأزمان أيضًا. فنظرًا لأنها خاصية تميِّز الفضاء، فإن كل سنتيمتر مكعب في الفضاء — ليس فقط «الفضاء الفارغ» الموجود بين النجوم، بل «الفضاء» الذي تشغله الشمس والأرض وغيرهما من الأجسام المادية وفيها الإنسان — يحتوي على الكمية نفسها من الطاقة المظلمة حتى لو زادت مساحة الكون وصار به المزيد من السنتيمترات المكعبة. ومِن ثَم يبقى الدفع نحو الخارج

الذي يوفِّره المجال كما هو مع تمدُّد الكون. ولكن السحب نحو الداخل بفعل الجاذبية يضعف مع تمدُّد الكون وتباعد المجرات بعضها عن بعض. بعد الانفجار العظيم مباشرة، كان تأثير الجاذبية قويًّا بما يكفي للتغلُّب على مجال لامدا وإبطاء تمدُّد الكون. ولكن أتى وقت حدث فيه نوع من تبديل الأدوار؛ إذ أصبح تأثير الجاذبية أضعف من مجال لامدا. في ذلك الوقت، بدأ التمدُّد يتسارع. حدث هذا منذ ما يقرب من ٤ مليارات سنة؛ أي في الوقت الذي تكوَّنت فيه الشمس والمجموعة الشمسية (ولكن هذا كله مجرَّد صدفة).

من السهل معرفة المقدار المطلوب يوميًّا من المادة وتوزيعها بالتساوي عبر الكون كي يصبح مسطحًا. وهذا المقدار يساوي تقريبًا $١٠^{-٢٩}$ جرامات لكل سنتيمتر مكعب، وهو ما يساوي خمس ذرات فقط من الهيدروجين في كل متر مكعب من الفضاء. بالطبع لا تتوزَّع المادة اليومية بهذه الطريقة، ولكنها تتكتَّل معًا داخل المجرات وعناقيد المجرات. ولكن المادة اليومية لا تُسهم إلا بمقدار ٥ بالمائة من الكثافة المطلوبة على أية حال. وأكثر من ثلثَي الكثافة الحرجة تأتي من مجال لامدا (المعروف أيضًا باسم الطاقة المظلمة) الذي يسهم بالفعل بنسبة تعادل نحو $١٠^{-٢٩}$ جرامات لكل سنتيمتر مكعب بالتساوي عبر الكون. لا توجد طريقة لقياس هذه النسبة في المختبرات على الأرض، وحتى كرة كبيرة مثل المجموعة الشمسية تمتد إلى نبتون لا تحتوي على الطاقة المظلمة إلا بمقدار يساوي مقدار الطاقة الذي تطلقه الشمس في ثلاث ساعات.

إذا كان هذا كل ما في الكون ولا شيء يتغيَّر، فسيزداد تسارع التمدُّد أكثر وأكثر؛ ما يؤدِّي في النهاية إلى تمزيق كل الأجسام المادية فيما كان يعرف باسم «التمزُّق العظيم». يُحتمل (بشكل مثير للاهتمام) أن «التوتر» المشار إليه في الاحتمال المستبعد رقم ٢ يوضِّح لنا أن ما يُعتبر الآن النموذج القياسي للكون، المشار إليه بالاختصار ΛCDM،[٤] يفتقد شيئًا ما، وأن الكون ينتظره مصير مختلف. لكنني لا أنوي مواصلة التكهُّن أكثر من ذلك في هذا الموضوع، وسأترككم مع ملخَّص لِمَا يُعرَف الآن باسم نموذج ΛCDM «الأفضل» للكون. تبلغ القيمة الحالية لثابت هابل ٦٧٫٤ ± ٠٫٥، وإجمالي كثافة الباريونات بالإضافة إلى المادة الباردة المظلمة يساوي ٣١ بالمائة من الكثافة الحرجة، ويسهم مجال لامدا بالنسبة الباقية، والتي تبلغ ٦٩ بالمائة. يأتي نحو سُدس كثافة المادة من الباريونات؛ وهي المادة التي خُلقنا منها وخُلق منها كل ما نراه ونحسه ونلمسه وكذلك كل ما نرصده باستخدام التلسكوبات؛ وتمثِّل — بعد التقريب لأقرب عدد صحيح — ٥ بالمائة (واحد على عشرين) من الكون. وإن لم يكن ذلك يبدو مستبعدًا في الوقت الحاضر، فبالتأكيد كان كذلك منذ ٢٥ عامًا عندما جذبت معضلة الباريونات انتباه علماء الكونيات للمرة الأولى.

هوامش

(١) ربما كانت البذرة نفسها ما يسمَّى بتقلُّب كمومي، يخلق من لا شيء على الإطلاق. تفضلوا بزيارة هذا الموقع: https://www.amazon.co.uk/Before-Big-Bang-Kindle-Single-ebook/dp/B00T6L43NY.

(٢) كتاب «رفيق إلى الكون»، ويدنفيلد ونيكلسون.

(٣) لا يزال بعضهم يقدِّم تفسيرات. حسنًا، هذا يبقيهم مشغولين.

(٤) لاحظ أن هذا المصطلح المختصر للنموذج القياسي لا يذكر حتى الباريونات؛ فالمادة التي خلقنا منها هي جزء ضئيل لا يُذكر من الكون.

الاحتمال المستبعد الرابع: يمكن كشف التموُّجات الناتجة عن تصادم الثقوب السوداء في الفضاء

أقل ما يقال عن قياس عمر الكون بأنه ١٣٫٨ مليار سنة، مع نسبة خطأ لا تزيد على مائة مليون سنة — أي أقل من ١ بالمائة — إنه قياس مبهر. ولكن على الطرف الآخر من مقياس الحجم، يمكن لعلماء الفيزياء قياس الإزاحات في أجهزة الكشف لمسافة ٤ كيلومترات، تصل إلى نحو واحد من عشرة آلاف جزء من عرض بروتون واحد. وكان هذا الإنجاز الذي بدا مستحيلًا (ولكنه في الواقع كان فقط غير محتمل إلى حد كبير، وليس مستحيلًا) ضروريًّا لهم كي يتمكَّنوا من اكتشاف تموُّجات الفضاء التي تنبَّأت بها النظرية العامة للنسبية لأينشتاين؛ موجات الجاذبية.

من الطرق المفيدة للتفكير في العلاقة بين المادة والفضاء وموجات الجاذبية أن نتخيَّل وزنًا ثقيلًا موضوعًا على لوح مطاطي مشدود مثل ترامبولين والوزن يهتز فوقه. وقد وردت روايتي الخاصة لقصة التموُّجات مع اختلافات بسيطة في العديد من كتبي،[١] ومِن ثَم يمكنك تجاهلها الآن إن لم تُرِد الاطلاع عليها. النقطة الرئيسة التي ينبغي التفكير فيها هنا هي مدى السرعة التي يمتد بها تأثير الجاذبية عبر الكون.

إن وجود أي جسم له كتلة من شأنه أن يغيِّر شكل الفضاء من حوله، ويمكننا تمثيل كتلة مثل الشمس بكرة بولينج سقطت على ترامبولين افتراضي. تُحدث الكرة انبعاجًا في السطح، وتتبع الكرات الزجاجية المتدحرجة عبر السطح خطوطًا منحنية حول المنطقة المنبعجة. على النحو نفسه، يدفع الفضاءُ المنحني حول جسم كبير مثل الشمس الأشياء (حتى الضوء) إلى اتباع مسارات منحنية، كما لو أن هناك قوة (الجاذبية) تجذبها نحو

الشمس. وكان توقُّع أينشتاين لمقدار انحناء ضوء النجوم وهو يمر بالقرب من الشمس هو الذي مكَّن علماء الفلك من تأكيد دقة نظريته العامة في النسبية أثناء كسوف الشمس عام ١٩١٩، وهو ما صنع شهرة أينشتاين.

لكن ماذا يحدث إذا انتُزعت كرة البولينج؟ يعود سطح الترامبولين المنحني إلى شكله المسطح، ولكنه لا يعود في الحال. فالتسطُّح ينتشر عبر السطح. تدور الأرض في مدار حول الشمس بفعل الانبعاج الذي تُحدثه الشمس في الزمكان.[٢] فإذا اختفت الشمس من الوجود فجأة، لن تطير الأرض في الفضاء من فورها؛ لأن الانبعاج سيظل موجودًا فترة من الزمن إلى أن يأتي وقت ترد إلينا فيه أخبار عن اختفاء الشمس. أدرك أينشتاين، من النظرية الخاصة في النسبية، أن لا شيء أسرع من الضوء؛ ومِن ثَم توقَّع أن تكون سرعة الجاذبية في التنقُّل مثل سرعة الضوء. فإذا اختفت الشمس؛ ستظل الأرض تدور في مدارها، وستبقى السماء مضيئة لمدة ثماني دقائق أخرى وأكثر قليلًا، ثم ستظلم السماء ويطير الكوكب بحريته في الوقت نفسه.

لكن تذكَّر أن كرة البولينج تُنتزع من فوق الترامبولين. حينئذٍ لا يعود السطح المشدود إلى الشكل المسطح من فوره؛ بل يظل يعلو ويهبط بعض الوقت إلى أن يستقر محدثًا تموُّجات عبر السطح. إذا اختفت الشمس، ربما سيتموَّج الفضاء من حولها (الزمكان)، بالطريقة نفسها، وستظل التموُّجات تهدأ بينما ينبسط السطح. وستكون هذه التموُّجات موجات جاذبية. عندما وقع أينشتاين في خطأ رياضي بعد بداية خاطئة، نشر الفكرة عام ١٩١٨. لكنه لم يتأكَّد البتة إن كان التأثير حقيقيًّا أم لا؛ ولذا قال ذات مرة: «إذا سألتني هل توجد موجات جاذبية أم لا، فلا بد أن تكون إجابتي لا أعلم. لكنها مسألة مثيرة للاهتمام كثيرًا.» لكن بعد مائة عام من نشر الفكرة بالضبط، اكتُشفت موجات مشابهة على الأرض للمرة الأولى.

تطلَّب هذا الاكتشاف جهدًا ضخمًا، لكن ثمة سببًا واحدًا يفسِّر تأكُّد علماء الفيزياء من أن الأمر يستحق ذلك الجهد، ألَا وهو امتلاكهم دليلًا مباشرًا على تأثيرات إشعاع الجاذبية على سلوك أزواج من النجوم يطلَق عليها النابضات الثنائية. والنجوم النابضة هي عبارة عن نجوم نيوترونية سريعة الدوران؛ كرات من المادة لا يتجاوز عرضها ١٠ كيلومترات، ولكن كثافتها تعادل كثافة نواة ذرة؛ إذ تحوي كتلة تساوي تقريبًا كتلة شمسنا، وكانت عبارة عن بقايا خلَّفها انفجار نجوم أكبر كثيرًا من الشمس مثل المستعرات العظمى. يمكننا اكتشاف تلك النجوم؛ لأن لها مجالات مغناطيسية قوية وأشعة ناتجة عن موجات راديو

تشبه الشعاع الصادر من المنارة. يومض بعض هذه الأشعة عبر الأرض ويمكن اكتشافها، لكن لا بد أن هناك العديد من النجوم النابضة التي لا توجه أشعاتها في الاتجاه الصحيح لنا كي نراها.

في عام ١٩٧٤، كان راسل هالس — وكان آنذاك طالب دكتوراه بجامعة هارفارد — يستخدم تلسكوبًا راديويًّا ضخمًا في مرصد أرسيبو في بورتوريكو (الذي ظهر في فيلم «اتصال») لإجراء بحث على النجوم النابضة تحت إشراف جوزيف تايلور. وفي ٢ يوليو ١٩٧٤، وجد نجمًا نابضًا في نطاق قدرة التلسكوب على تحديد الهُويات، وبعد تحقُّق حثيث على مدى الأسابيع القليلة التالية، تأكَّد من أنه اكتشاف حقيقي، ووصف الجسم بالوسم PSR 1913 + 16. وقد ثبت أنه نموذج رائع من نوعه. كان النجم النيوتروني يدور مرة كل ٥٨,٩٨ مللي ثانية، ما جعله ثاني أسرع نجم نابض عُرِف حينذاك؛ ومِن ثَم كان الشعاع يُصدر سبع عشرة ومضة كل ثانية في أداة الكشف التي استخدمها هالس.

لكن مع استمرار هالس في رصد النجم النابض، اكتشف أنه يتغيَّر بطريقة بدت مستحيلة. وأظهرت القياسات نمطًا سلوكيًّا معقَّدًا للنجم. ففي بعض الأحيان كانت النبضات تصل في وقت أقرب قليلًا من المتوقَّع، وأحيانًا في وقت أبعد قليلًا من المتوقَّع. وكانت هذه التباينات تتغيَّر بسلاسة وعلى مدى مدة متكرِّرة بواقع ٧,٧٥ ساعات. وأدرك هالس أن التغييرات لا يمكن أن يتسبَّب فيها إلا نجم نابض يدور حول نجم آخر. أظهرت السرعة التي كانت تحدث بها التغييرات أن مدار النجم PSR 1913 + 16 لا بد أن يكون صغيرًا للغاية، ما يعني أن النجم المرافق لا بد أن يكون صغيرًا للغاية؛ وهو نجم نيوتروني آخر. كان النجمان حتمًا يشكِّلان بالفعل ثنائيًّا لهما الكتلة نفسها ويدور كل منهما حول مركز الكتلة المشترك. ولذا أصبح معروفًا بـ «النجم النابض الثنائي» على الرغم من أن نجمًا واحدًا فقط من النجوم النيوترونية هو ما اكتُشف بوصفه نجمًا نابضًا.

هذا نظام صارم، ما يجعله حقل اختبارات مثاليًّا لتكهُّنات النظرية العامة. مع استمرار عمليات الرصد، تبيَّن أن النجم النابض يدور حول رفيقه مرة كل ٧ ساعات و٤٥ دقيقة، بمتوسط سرعة يبلغ ٢٠٠ كيلومتر في الثانية، ويصل إلى سرعة أقصاها ٣٠٠ كيلومتر في الثانية؛ أي جزء على ألف من سرعة الضوء. تبلغ المسافة حول المدار نحو ٦ ملايين كيلومتر، ومن قبيل المصادفة أن تلك المسافة تساوي محيط الشمس تقريبًا. لذا فلو كان مدار النجم النابض الثنائي دائريًّا، لصار النظام داخل الشمس، وعندها تصبح المسافة بين النجمَين النيوترونيَّين مساوية تقريبًا للمسافة بين مركز الشمس

وسطحها. وعلى الرغم من ذلك، فإن المدارات بيضاوية الشكل كما نعلم؛ ومِن ثَم تصبح «الحركة الثنائية» التي يؤدِّيها النجمان أكثر تعقيدًا. فعند أقل تباعد بين الجسمَين، تصبح أقصر مسافة فاصلة بينهما ١٫١ نصف قطر شمسي، وعند أقصى تباعد بينهما تكون المسافة الفاصلة بينهما ٤٫٨ قطر شمسي. وتُعَد هذه بنية مثالية لإنتاج موجات جاذبية.

يمكن معرفة السبب وراء ذلك إذا تخيَّلت كرتَين معدِنيتَين مجوفتَين متصلتَين بقضيب قصير، تطفوان في خزان مياه. إن لم تتحرَّكا؛ فلن تكون هناك تموُّجات في المياه. لكن إن كانت كلتا الكرتَين تدور إحداهما حول الأخرى مثل دمبل دوار، فستترقرق الأمواج نحو الخارج عبر السطح. الشيء نفسه يحدث للزمكان عندما يدور نجمان نيوترونيان تفصل بينهما مسافة أقل من قطر الشمس حول بعضهما. لكن توليد الموجات يحتاج إلى طاقة. وعندما تذهب الطاقة من النجم النابض الثنائي إلى موجات الجاذبية، ينبغي أن يلتف النجمان معًا للتخلُّص من طاقة الجاذبية، ما يجعلهما يدوران بسرعة أكبر في تلك العملية. وعندئذٍ ستتقلَّص (تتحلَّل) المدة المدارية بمقدار ضئيل للغاية، يمكن حسابه بدقة باستخدام النظرية العامة.

توقَّع العلماء أن تتقلَّص الفترة المدارية للنجم النابض الثنائي، التي تبلغ ٢٧٠٠٠ ثانية، بمقدار ٠٫٠٠٠٠٠٠٣ بالمائة، أو ٧٥ جزءًا من المليون من الثانية، كل عام. ولقياس مثل هذا التأثير الضئيل، اضطُر علماء الفلك إلى وضع أنواع التأثيرات كافة في الحسبان، وفي ذلك حركة الأرض في مدارها حول الشمس، والتغييرات التي تطرأ على دوران الأرض نفسها. وبأخذ كل هذه التأثيرات في الحسبان، بعد تحليل ما يقرب من ٥ ملايين نبضة من النجم PSR 1913 + 16، استطاع تايلور في ديسمبر من عام ١٩٧٨ أن يعلن أن تحلُّل مدار النجم النابض الثنائي كان يحدث بما يتفق تمامًا مع توقُّعات النظرية العامة. إذن فالنظرية العامة صحيحة، وموجات الجاذبية حقيقية. وهناك الآن أكثر من ٥٠ نجمًا نابضًا ثنائيًّا معروفًا، ما يقدِّم مزيدًا من الأدلة التي تدعم دقة النظرية العامة، ولكن النجم الذي اكتشفه هاسل وتايلور لا يزال هو الأساس.

مع نهاية سبعينيات القرن العشرين، تبدَّدت الشكوك بشأن وجود موجات الجاذبية. ولكن هذا خلَّف التحدي الهائل المتمثِّل في اكتشاف موجات الجاذبية مباشرة، هنا على الأرض. فقد رأى معظم الناس هذا الأمر مستحيلًا؛ لأنه في الوقت الذي تصلنا فيه موجات من شيء مثل نجم نابض ثنائي، تصبح تلك الموجات أصغر بكثير من حجم الذرة. ولكن ثمة أحداثًا كونية لا بد أنها تنتج موجات أكبر بكثير، حسبما تتنبَّأ النظرية، ما أعطى بصيصًا من الأمل للقائمين على التجارِب.

ارتكز ذلك الأمل على احتمالية اكتشاف موجات الجاذبية باستخدام تقنية قياس التداخل. تعتمد هذه الطريقة حرفيًّا على طريقة تداخل شيئَين (مثل أشعة الضوء في النسخة المختبرية لتلك التجارِب) أحدهما مع الآخر. وفيما يلي تشبيه آخر من تشبيهاتي المألوفة. عند إلقاء حصاة في بركة مياه راكدة، تمتد الأمواج بسلاسة في جميع الاتجاهات. لكن في حالة إلقاء حصاتَين في البركة في الوقت نفسه، ينتج عن ذلك مجموعتان من الأمواج تتداخل إحداهما مع الأخرى، ما يؤدِّي إلى خلق نمط أعقد. في بعض الأماكن، يتلاشى تأثير الموجات بحيث تترك السطح مسطحًا بشكل أو بآخر، وفي أماكن أخرى، تتجمَّع الموجات معًا بحيث تكوِّن المزيد من الموجات العالية. ربما تكون تلك العملية معروفة لك من تجرِبة في الفصل الدراسي على الضوء لتوضيح مدى تشابه سلوكه مع سلوك الموجات. في غرفة مظلمة، يسلَّط شعاع من الضوء من خلال ثقبَين صغيرَين في حاجز (قطعة ورق أو بطاقة تفي بالغرض)، ويسقط على حاجز آخر. تتداخل موجات الضوء الممتدة من كل ثقب في الحاجز الأول مثل تلك التموُّجات في البركة، ما يخلق نمطًا من ضوء وظل على الحاجز الثاني؛ أي نمط تداخل. أدرك علماء الفيزياء أن هذا النوع من التداخل يمكن استخدامه، من حيث المبدأ، لقياس التغيُّرات البالغة الصغر التي تنتج عن قيام موجة جاذبية بضغط الفضاء ومده بين جسمَين. لكن تجرِبة المبدأ عمليًّا كانت ستصبح صعبة ومكلِّفة. وقد وصفت جانا ليفين في كتابها «أحزان الثقب الأسود»[٣] بأسلوب مسلٍّ الملحمة الطويلة التي تضمَّنت مزيجًا من الصدامات السياسية والعلمية والشخصية التي أعقبت هذا الإدراك، لكنني سأختصر الطريق وأتطرق مباشرة إلى نتيجة كل هذه الإشكالات.

يمكن تطبيق طريقة قياس التداخل على البحث عن موجات الجاذبية بسبب الطريقة التي تشوِّه بها تلك الموجات شكل الزمكان. إنها لا تُنتج تموُّجات في اتجاه حركة الموجة، كما تفعل الأمواج المائية، ولكنها تغيِّر شكل الفضاء بزوايا قائمة متعامدة على الاتجاه الذي تتحرَّك فيه الموجة. ويعمل هذا على ضغط الفضاء إلى الداخل، ويشده إلى الخارج بطريقة منتظمة. عندما يتم ضغط أحد الاتجاهات، يتمدَّد الاتجاه المتعامد على الضغط بزوايا قائمة، والعكس بالعكس. ومِن ثَم أدرك علماء الفيزياء أنه لو توافر لديهم كاشف له ذراعان متعامدتان بينهما زوايا قائمة، على شكل حرف «L» كبير، على أن تكون الذراعان بالطول نفسه، كانت أي موجة جاذبية ستمر عبره ستضغط إحدى الذراعَين، وفي الوقت نفسه ستُمدد الذراع الأخرى. تحمل هذه الأطوال المتغيِّرة «توقيعًا» مميَّزًا لموجات الجاذبية التي يمكن رصدها باستخدام طريقة قياس التداخل إذا كانت الذراعان طويلتَين بدرجة كافية، وأجهزة الكشف حسَّاسة بدرجة كافية.

ينبغي أن يكون الضوء اللازم لتلك المهمَّة صادرًا من أجهزة ليزر؛ إذ إنها تُصدر أشعة نقية للغاية، وأطوالًا موجية في منتهى الدقة. ينبغي تقسيم ضوء الليزر إلى شعاعَين يتماشيان تمامًا بعضهما مع بعض، ثم يُرسَل الشعاعان بطول الذراعَين في الكاشف، بحيث يتعامدان بعضهما على بعض بزوايا قائمة، ولكن بنفس الطول بالضبط قبل أن تنعكس عبر المسارات نفسها لتندمج مرة أخرى وتُحدث نمط تداخل، يُرصَد بنظام تلقائي. إذا أُعدَّت التجرِبة إعدادًا مثاليًّا، فستلغي الموجات العائدة تأثير إحداها على الأخرى، ولن يكتشف نظام الرصد والمراقبة شيئًا. ولكن عندما تمر موجة جاذبية خلال التجرِبة، تتقلَّص ذراع وتتمدَّد الأخرى؛ ومِن ثَم يتبدَّد التناغم في حركة الشعاعَين. يمكن تسجيل التداخل الناتج وعرضه على شاشة جهاز مراقبة في شكل خطوط متموِّجة تكافئ نمط الضوء والظل الناتج عن تجرِبة الفصل الدراسي باستخدام الثقبَين.

ثمة سؤال بَدَهيٌّ هنا: كيف تكتشف أشعة الليزر تمدُّد الفضاء وانضغاطه، في حين أنها تتأثَّر هي الأخرى بموجات الجاذبية، كونها تتمدَّد وتنضغط مثل أي شيء آخر؟ تكمن الإجابة في أننا في الواقع نتعامل مع الزمكان وليس الفضاء فقط. إن تشوُّه شكل الزمكان يؤثِّر في المدة التي تستغرقها أشعة الضوء للانتقال من طرف في التجرِبة إلى الطرف الآخر. وما يقيسه جهاز قياس التداخل بالفعل هو فارق في الزمن وليس فارقًا في المكان، ولكن يسهل تحويل ذلك الفرق إلى مكافئ مكاني.

طُرح مقترح رسمي لجهاز لكشف موجات الجاذبية في الولايات المتحدة عام ١٩٨٣. وعلى المستوى نفسه من الطموح، طلب المقترح زوجًا متطابقًا من الكواشف ووضعهما في مواقع يفصل بينها مسافة بعيدة. تمثَّلت الفكرة في أن أمواج الجاذبية ستؤثِّر في الجهازَين كلَيهما بالطريقة نفسها، مع تأخير زمني طفيف، ما يعني إمكانية تمييزها عن الاضطرابات الموضعية التي تؤثِّر في كل كاشف على حدة. وضع الاقتراح الأصلي تصوُّرًا بأن يكون لكل كاشف ذراعان بطول ١٠ كيلومترات، وستبلغ تكلفة المشروع ٧٠ مليون دولار. وافقت مؤسَّسة العلوم الوطنية الأمريكية على المقترح عام ١٩٨٦، ولكن اضطُروا إلى تقليص حجم أذرع الكاشف إلى ٤ كيلومترات؛ لأن المواقع المتاحة لم تكن كبيرة كفاية لتسع طولًا أكثر من ذلك. بدأت عملية الإنشاء في أواسط تسعينيات القرن العشرين، ولكن لم تكن مفاجأة أن جاءت التكلفة أعلى على الرغم من أن الكواشف كانت أصغر؛ إذ ارتفعت بما يزيد على مليار دولار. يمكن القول إن السمة الأبعد احتمالًا للمشروع بأكمله هي حصوله على تمويل من الأساس! لقد أُنشئت الكواشف في مواقع

متباعدة قدر الإمكان داخل ولايات متجاورة في الولايات المتحدة في هانفورد بولاية واشنطن، وليفينجستون بولاية لوزيانا. وعُرف ذلك المشروع باسم مرصد قياس تداخل موجات الجاذبية بالليزر (ليجو)، وكان أغلى مشروع موَّلته مؤسَّسة العلوم الوطنية، ما يعني أن الكثيرين قد تنفَّسوا الصعَداء عندما اكتُشف بالفعل شيء على غير المتوقع في سبتمبر من عام ٢٠١٥. لكن الطريقة التي تمَّ بها الاكتشاف مثيرة للاهتمام مثل الاكتشاف نفسه.



موقع الكشف الخاص بمرصد ليجو بمدينة ليفينجستون، لويزيانا. (معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا/معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا/ليجو).

في أثناء بناء الكواشف واختبارها، توصَّل المنظِّرون بدقة إلى نوع «الإشارة» التي يمكنهم اكتشافها باستخدام تطبيقات المحاكاة الحاسوبية القائمة على النظرية العامة في النسبية.[٤] وكان المسار الأكثر أمانًا لهم للتحرُّك هو تصادم ثقبَين سوداوَين واندماجهما. يحدث هذا حتمًا في أي نظام ثنائي يشبه النجوم النابضة الثنائية (بل إنه حتمًا سيطول في النهاية إلى النجم النابض الثنائي نفسه)، حين تلتف الأجزاء المكوَّنة معًا، ولكن الثقوب

السوداء أضخم من النجوم النابضة، وستؤدِّي إلى انفجارات موجية أكبر. لكن في وسط ذلك، قام المنظِّرون أيضًا بحساب ما يمكن رصده عند اندماج نجمَين نيوترونيَّين. نُفِّذت عمليات محاكاة لطريقة التفاف ثقبَين أسودَين واندماجهما لمجموعة متنوِّعة من الثقوب السوداء ذات الكتل المختلفة. واكتشفوا أنه لو صحَّت معادلات أينشتاين، فسيؤدِّي مثل هذا الاندماج إلى سمة مميزة لموجات الجاذبية أطلقوا عليها «الصرير»، وفيها يقصر الطول الموجي للموجات أكثر وأكثر (وترتفع نغمة صوتها بالمعنى الموسيقي) كلما اقترب الثقبان من بعضهما، ثم ينقطع فجأة ويندمجان في جسم واحد. في إطار ما يتعلَّق بالأصوات، قد يشبه ذلك الصوت الذي يصدر منك عندما تُمرِّر يدك بسرعة عبر مفاتيح بيانو من اليسار إلى اليمين. ومِن ثَم عرف القائمون على التجارِب ما كانوا يبحثون عنه بالضبط. ولكنهم وضعوا لأنفسهم موعدًا نهائيًّا لإنهاء مهمتهم، وكأن عملهم لم يكن بالصعوبة الكافية. كان أينشتاين قد انتهى من نظريته العامة في نوفمبر ١٩١٥، ونُشرت رسميًّا في أوائل عام ١٩١٦، وهي السنة نفسها التي توصَّل فيها لأول مرة إلى إشارة إلى أن النظرية تتنبَّأ بوجود موجات الجاذبية. وقرَّر فريق «ليجو» أنه سيكون من اللطيف لو استطاعوا أن يكتشفوا تلك الموجات في عام ٢٠١٦؛ أي بعد مائة عام من نشر نظرية النسبية. وعلى غير المتوقَّع، ولدهشتهم، أبلَوا بلاءً أفضل من ذلك.

إن تفاصيل أنظمة الكشف محيرة للعقل. فالضوء المنبعث من أشعة ليزر بقدرة ٢٠ وات يسير عبر كل ذراع من الذراعَين الممتدَّتين بطول ٤ كيلومترات عبر أنبوب مفرَّغ يبلغ قطره مترًا واحدًا. في أطراف الأنابيب، توجد مرايا خاصة عاكسة جزئيًّا تُرجِع الضوء ذهابًا وإيابًا بمعدل ٢٨٠ مرة تقريبًا قبل إطلاقه في نظام جهاز قياس التداخل، ما يعزِّز قوة الكاشف بفاعلية. ولكن نظرًا لأن المنظِّرين تنبَّئُوا بأن الموجات التي كانوا يبحثون عنها ستغيِّر تباعد المرآة بمقدار نحو $١٠^{-١٨}$ أمتار لا أكثر؛ أي أقل من جزء من ألف من قطر بروتون، لزم حجب المرايا عن أي شكل من أشكال الاهتزاز الخارجي بداية من حركة المرور على الطرق القريبة (وفي ذلك الموظَّفون الذين يستقلُّون دراجاتهم في طريقهم إلى العمل) إلى حركة أنظمة الطقس على الجانب الآخر من القارة، وحركة التيارات في المحيط الهادئ، وكل زلزال كبير على الأرض.

نُفِّذ ذلك عن طريق تعليق كل كتلة من كتل «ليجو» المخصَّصة للاختبارات (وهي أوزان ثقيلة رُبطت بالمرايا)، التي تزن ٤٠ كيلوجرامًا في جهاز مكوَّن من أربعة بناديل. كان جزء من ذلك التعليق «سلبيًّا»؛ إذ كان ببساطة يسمح لهيكل الجهاز أن يتحرَّك حوله

بينما تتدلَّى كتل الاختبار أسفله. لكن الجزء الذكي حقًّا تمثَّل في نظام «نشط»، كان يقيس الاضطرابات الاهتزازية، ويدفع الطرف الآخر بلطف لتبديدها، وهي الطريقة التي تستجيب بها سماعات حجب الضوضاء للأصوات الخارجية وتحجبها.

بعد الانتهاء من وضع كل شيء في مكانه وخضع للاختبار، اعتُزم إجراء أول عملية تشغيل علمي للكاشفين في سبتمبر ٢٠١٥. وفي إطار الاستعدادات، أُجري اختبار تشغيل للتأكُّد من عمل جميع تلك الأنظمة في منتصف ليل الإثنين الموافق ١٤ سبتمبر. خلال فترة توقُّف وسط تلك الاختبارات، تُرك الكاشفان في وضع الرصد على الرغم من أنه لا أحد كان يتوقَّع رصد أي شيء. لكن في الساعة ٢:٥٠ صباحًا بتوقيت مدينة هانفورد، والساعة ٤:٥٠ بتوقيت مدينة ليفينجستون؛ أي في الوقت نفسه تقريبًا، سجَّل كل كاشف صريرًا استمرَّ ٢٠٠ ملي ثانية. التقط الكاشفان إشارة لموجة جاذبية أقوى ممَّا توقَّع الجميع بكثير، وبسرعة أكبر من التي توقَّعوها بكثير أيضًا. ونظرًا لوجود تأخير بمقدار ٦٫٩ ملي ثانية فقط بين وصول الإشارة إلى الكاشف الأول ووصولها إلى الكاشف الثاني، فقد أكَّد هذا أن الموجة سافرت بسرعة الضوء.

تتوافق تفاصيل الصرير مع التنبؤات الخاصة بالتفاف ثقبَين أسودَين واندماجهما معًا، تساوي كتلة أحدهما كتلة الشمس ٢٩ مرة، بينما تعادل كتلة الثقب الآخر كتلة الشمس ٣٦ مرة، بحيث يكوِّنان معًا ثقبًا أسود واحدًا تعادل كتلته كتلة الشمس ٦٢ مرة. توضِّح لنا الكتلة «المفقودة» أن ثلاثة أضعاف كتلة الشمس قد تحوَّل إلى طاقة في شكل موجات جاذبية في أثناء تلك العملية. وهذا يعادل $١٠^{٢٣}$ ضعفًا (مائة مليار تريليون ضعف) من السطوع الشمسي.

بعد التحقق أكثر من مرة من الملاحظات للتأكُّد من عدم وجود أخطاء، أعلن الفريق رسميًّا عن اكتشافه هذا في ١١ فبراير ٢٠١٦؛ أي بعد مائة عام بالضبط من إعلان النظرية العامة في النسبية على العالم. لكن حتى قبل نشر الخبر، كشف مرصد «ليجو» عملية اندماج أخرى لثقب أسود هزَّت الكاشفين في يوم عيد الميلاد عام ٢٠١٥.[٥] نتج الاهتزاز عن اندماج ثقبَين أسودَين تبلغ كتلتهما أربعة عشر ضعفًا وثمانية أضعاف كتلة الشمس؛ إذ اندمجا وكوَّنا ثقبًا أسود تعادل كتلته ٢١ ضعف كتلة الشمس، ولم تتحوَّل سوى كتلة شمسية واحدة من المادة إلى طاقة. وأثبت هذا أن عملية الرصد الأولى لم تكن مجرَّد ضربة حظ.

منذ عام ٢٠١٥، أصبح علم فلك موجات الجاذبية أمرًا شبه عادي. فلم يَعُد كشف اندماج آخر ثقبَين أسودَين خبرًا مثيرًا، مثلما لم يَعُد اكتشاف كوكب آخر يدور حول نجم بعيد خبرًا مثيرًا أيضًا. لكن ثمة نوعًا آخر من الاندماج يستحق الإشارة إليه.

في الوقت الحاضر، يوجد مرصد ثالث لموجات الجاذبية، وهو مرصد أوروبي يسمَّى فيرجو (نسبة لكوكبة العذراء) مشابهًا لمرصد ليجو. وبفضل وجود ثلاثة مراصد تعمل على الأرض، يمكن للعلماء أن يحدِّدوا المنطقة في السماء التي تصدر منها موجات الجاذبية بمزيد من الدقة. وقريبًا ستُطلَق كواشف مماثلة في اليابان والهند، ولكن كواشف المراصد الثلاثة القائمة كانت كافية لاكتشاف مذهل في صيف عام ٢٠١٧. ففي شهر أغسطس من ذلك العام، رصدت كواشف مراصد موجات الجاذبية الثلاثة جميعها إشارة عُرفت بأنها عملية اندماج لنجم نيوتروني ثنائي وقع على مسافة تتراوح بين ٨٥ مليون و١٦٠ مليون سنة ضوئية. بلغ مجموع كتلة النجمَين المتصادمَين نحو ثلاثة أضعاف كتلة الشمس. وبفضل قدرة علماء الفلك المختصين بموجات الجاذبية على تثليث المصدر، تمكَّنوا من إخبار علماء فلك آخرين عن الاتجاه الذي ينبغي توجيه أجهزة التلسكوب إليه لمعرفة ما إذا كان بإمكانهم رصد أي شيء مثير للاهتمام له علاقة بالحدث أم لا. وفي غضون ساعات، حدَّدت خمس مجموعات مصدرًا جديدًا للضوء في مجرة معروفة باسم NGC 4993. تغيَّر هذا الضوء من الأزرق الساطع إلى الأحمر الباهت على مدى الأيام القليلة التالية، وبعد أسبوعَين بدأ في إصدار أشعة سينية وموجات راديوية. وقد أوضحت الدراسات الطيفية للضوء المتلاشي أن الانفجار الضخم المرتبط بعملية اندماج النجم النيوتروني الثنائي (المسمَّى المستعر فوق العظيم) نتج عنه كميات هائلة من العناصر الثقيلة ومنها الذهب، وهو ما أثلج صدور الصحفيين. وساهم هذا في حل لغز ظل قائمًا لزمن طويل.

حسبما ورد في كتابي «سبعة أعمدة للعلم»، عَلِم علماء الفلك قبل ٢٠١٧ أن الذهب وبعض العناصر الثقيلة الأخرى يمكن أن تتكوَّن في نوع آخر من الانفجار النجمي مثل المستعرات العظمى، ولكنهم كانوا يعلمون أيضًا أنه يستحيل أن تكون هذه الأحداث هي منشأ كل العناصر الثقيلة التي نراها في الكون. وتبيَّن أن المستعرات فوق العظيمة قادرة على تكوين كمية كافية من العناصر الثقيلة لسد الفجوة. فالحدث الذي شوهد في أغسطس ٢٠١٧ أنتج وحده ما بين ثلاث كتل إلى ثلاث عشرة كتلة أرضية من الذهب، بينما الأحداث المشابهة مسئولة على الأقل عن إنتاج نصف الذهب الموجود في الكون في الوقت الحاضر. على الرغم من أنه قد يبدو احتمالًا مستبعدًا، فإن هذا يعني أن قدرًا كبيرًا من الذهب الموجود في أي حُلِي نمتلكها صُنِّعت عند تصادم نجمَين نيوترونيَّين واندماجهما.

هوامش

(١) يمكن الاطلاع على أحدث المؤلَّفات هنا: https://www.amazon.co.uk/Discovering-Gravitational-Waves-Kindle-Single-ebook/dp/B071FFJT74/ref=sr_1_1?keywords=gribbin+gravitational+waves&qid=1584951903&s=digital-text&sr=1-1.

(٢) لا بد أن أكون حذرًا هنا ولا أقول إنه مجرَّد انبعاج في الفضاء؛ فالموقف أكثر تعقيدًا بعض الشيء من تشبيه كرة البولينج، لكني لن أخوض في التفاصيل.

(٣) صادر عن دار نشر بودلي هيد، لندن، ٢٠١٦.

(٤) يستخدم علماء الفلك مصطلح «إشارة» للإشارة إلى أي انفجار للضوء، أو أي إشعاع ينبعث من الفضاء، مثل الأصوات الراديوية الواردة من النجوم النابضة، علمًا بعدم وجود ما يدل على أن أحد أجهزة الاستخبارات هو مصدرها.

(٥) يوم عيد الميلاد في الولايات المتحدة. يقتبس علماء الفلك عمومًا الأوقات من نظام يشبه نظام توقيت جرينتش في الأساس؛ ما يعني أن الحدث وقد وقع في الساعات الأولى من يوم ٢٦ ديسمبر، ٢٠١٥؛ لذا غالبًا ما يشار إليه بحدث يوم الصناديق.

الاحتمال المستبعد الخامس: نيوتن والأسقف والدلو والكون

يبدو هذا موضعًا جيدًا للابتعاد عن علوم القرن الحادي والعشرين المتطوِّرة، ونلتقط أنفاسنا بالنظر في احتمال مستبعد يميل أكثر إلى الفلسفة (أو الميتافيزيقا) أرهق عقل مفكِّر بقدر إسحاق نيوتن.[1] وإلى جانب نيوتن، تطلَّب الأمر أيضًا دلوًا من الماء وحبلًا طويلًا وأسقفًا، ما يجعل الأمر يبدو وكأننا نستهل بمزحة، ولكنه في الحقيقة يؤدِّي إلى «حقيقة عميقة» عن طبيعة الكون، ساعدت ألبرت أينشتاين في وضع النظرية العامة في النسبية.

في الواقع، لستَ بحاجة إلى دلو كي تفهم محور اللغز. فهو يتجلَّى بوضوح في كل مرة تَقلب فيها الكريمة في قهوتك وتشاهد الأنماط الجميلة الناتجة عن دوران القهوة. كيف «تعرف» الكريمة — والقهوة — أنها تدور في حركة دُوامية؟ قد تخمِّن أن ذلك يرجع إلى حركتها عند جوانب الكوب. ولكن الإجابة أبعد من ذلك.

كان نيوتن أول من أدرك دلالات وتداعيات ذلك (وعلى حد علمي، تبادرت الفكرة إلى ذهنه وهو يشاهد دوران القهوة في الكوب؛ إذ كان شرب القهوة رائجًا للغاية في زمنه). لكن يبدو أن جاليليو كان أول شخص يشير إلى سمة مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالكون، وهي أن تسارع الجسم، وليس السرعة التي يتحرَّك بها، هو ما يكشف عن وجود القوى التي تؤثِّر على هذا الجسم. فنظرًا إلى الاحتكاك ومقاومة الرياح والمؤثرات الأخرى التي لا يمكن التخلُّص منها مطلقًا، دائمًا ما توجد قوًى خارجية على الأرض تحاول أن تبطئ سرعة الأجسام المتحركة. ولا بد من استمرار الدفع حتى يستمر في الحركة. ولكن في الفضاء، كما شاهدنا جميعًا في عمليات البث التلفزيوني من رُوَّاد الفضاء، تستمر الأشياء في الحركة في

خط مستقيم إلى أن تشعر بتأثير قوة ما. ولعل أقرب مثال على الأرض حتى نقرِّب الصورة هو حركة قرص هوكي الجليد السريعة عبر الجليد، أو (وهو أقل شبهًا في بعض الحركة بالحركة في الفضاء) القرص على طاولة لعبة الهوكي الهوائي. فالقرص في هاتَين اللعبتَين يبدو في الواقع أنه يستمر في التحرُّك في خط مستقيم وبسرعة ثابتة حتى تأتي قوة خارجية وتتداخل مع حركته. وقد كان نيوتن، من دون مشاهدة أي بث تلفزيوني على الإطلاق، هو من توصَّل إلى القانون الذي ينص على أن تسارع الجسم الناتج عن قوة ما يساوي تلك القوة مقسومة على كتلة الجسم، وتوسَّع في هذا (بمساعدة قانون الجاذبية الذي وضعه) لشرح مدارات الكواكب حول الشمس. باللغة المعاصرة، يطلق على الإطار المرجعي الذي تتحرَّك الأجسام بداخله بسرعة ثابتة ما لم تؤثِّر فيه قوًى خارجية إطار الإسناد العطالي، وقد تبادر إلى عقل نيوتن فكرة حتمية وجود إطار إسناد عطالي أساسي — وهو معيار مطلق للسكون — يحدِّده فضاء فارغ بشكل أو بآخر. وذهب إلى أن الأجسام تتحرَّك بسرعة ثابتة «بالنسبة إلى الفضاء الفارغ» ما لم تتسارع حركتها بفعل قوًى خارجية.

توجد معضلة واضحة في هذه الفكرة. كيف لنا أن نعرف ماهية الفضاء الفارغ؟ لا يمكن دق مسمار في ذلك الفضاء، ومِن ثَم قياس كل السرعات بالنسبة إلى هذا المسمار. إذن كيف يمكن تحديد هذا المعيار المطلق للسكون؟ هذا هو الموضع الذي يتدخَّل فيه الدلو. فقد فكَّر نيوتن أنه يستطيع استخدامه لتحديد إطار الإسناد العطالي الأساسي، حسبما ذكر في كتابه العظيم «المبادئ»:[٢]

> إن التأثيرات التي تميِّز الحركة المطلقة عن الحركة النسبية هي قوى الانحسار عن محور الحركة الدائرية ... فإذا كان هناك وعاء معلَّق في حبل طويل، يُسحب كثيرًا لدرجة تجعل الحبل يلتف وينحني بقوة، ثم يُملأ بالماء ويثبَّت في وضع السكون مع الماء [ثم يُترك]؛ عندئذٍ، وبفعل حركة مفاجئة لقوة أخرى، يُلَف في الاتجاه المعاكس، وبينما يقوم الحبل بفك نفسه بنفسه ... سيكون سطح المياه مستويًا، كما كان قبل أن يبدأ الوعاء في التحرُّك؛ ولكن بعد ذلك سيبدأ الماء بفعل الوعاء الذي ينقل حركته إلى الماء تدريجيًّا في الدوران والانحسار شيئًا فشيئًا من الوسط، بينما يرتفع في جوانب الوعاء، محوِّلًا نفسه إلى شكل مقعَّر (كما رأيتُ)،[٣] وكلما زادت سرعة الحركة، زاد ارتفاع المياه في الجوانب.

إذا أُمسِك «الوعاء» فجأة بعد ذلك وبقي ساكنًا، ستستمر المياه التي بداخله في الدوران، وستظل ترتفع من الجوانب، ثم ستبطئ تدريجيًّا وتنبسط، مثل القهوة التي

تقلُّبها في الكوب. لا يعنينا هنا الحركة النسبية للدلو والمادة السائلة، ولكن ما يعنينا هو نسبة الحركة المطلقة للمادة السائلة (حسبما ارتأى نيوتن) إلى الفضاء الفارغ. عند دوران الدلو مع سكون المياه، يكون السطح منبسطًا. أمَّا عند دوران المياه مع سكون الدلو، يكون سطح الماء مقعَّرًا. وعند دوران كلَيهما مع غياب أي حركة لأحدهما بالنسبة إلى الآخر، يكون السطح منحنيًا. في نسخة حديثة من التجرِبة، يمكن وضع كوب القهوة في منتصف طاولة دوَّارة ومشاهدته يدور. سيدور الكوب والسائل كلاهما، ولكن سيظل السائل يشكِّل سطحًا مقعَّرًا. فالسائل «يَعرف» أنه يدور ويتفاعل طِبقًا لذلك. واضطُر الفلاسفة الذين اعترضوا على حجة نيوتن وفكرة الفضاء المطلق استنادًا إلى أنه لا يمكن لشيء غير مرئي تمامًا أن يكون حقيقيًّا، إلى إيجاد طريقة أخرى لتفسير ما يجري في دلو نيوتن. واستغرق الأمر منهم ٣٠ عامًا، لكن بعد ذلك توصَّل جورج بيركلي؛ وهو أيرلندي وُلد في عام ١٦٨٥ (أي قبل عام من نشر كتاب «المبادئ») وترعرع وأصبح فيلسوفًا واقتصاديًّا ورياضيًّا وفيزيائيًّا وأسقفًا (ليس بالضرورة أن يكون بذلك الترتيب، حسب كلمات إريك موركامب)، توصَّل إلى إجابة.[٤]

قال بيركلي إنه لا بد من قياس كل أنواع الحركة بالنسبة إلى شيء ما. «الفضاء المطلق» الذي تحدَّث عنه نيوتن لا شيء حرفيًّا، ولا يمكن إدراكه، ومِن ثَم لا يناسب الغرض هنا. وكما قال: «لا يوجد فضاء حيث لا توجد مادة.» وأشار إلى أنه لو قُضِي على كل شيء في الكون ما عدا جسم كروي واحد (ولنسمه الأرض)، فسيستحيل تصوُّر أي حركة لتلك الكرة سواء عبر الفضاء أو في مدار. فلن يكون ثمة شيء للقياس على أساسه، ومن ثم لن يكون للحركة معنًى. حتى لو كان هناك جسمان كرويان منبسطان تمامًا يدوران بعضهما حول بعض في مدار؛ فلن يكون ثمة طريقة لقياس تلك الحركة. لكن «لنفترض أن السماء بنجومها الثابتة خُلقت فجأة وكنا في موقع يؤهِّلنا لتخيُّل حركات الأجسام الكروية بموقعها النسبي إلى مختلِف أجزاء الكون.» لذا «يكفي أن يحل محل الفضاء المطلق فضاء نسبي يتحدَّد عن طريق السماء ذات النجوم الثابتة.» ووفقًا لِمَا ذكره الأسقف بيركلي، ترتفع القهوة التي تقلَّب في الكوب في الجوانب لأنها تعرف أنها تدور «بالنسبة إلى النجوم البعيدة». يوجد مثال آخر يشاهده العديد من الناس في الوقت الحاضر. غالبًا ما تحتوي متاحف العلوم على نموذج كبير لبندول فوكو يتأرجح بحركة ثقيلة ذهابًا وإيابًا. يستمر هذا البندول في التأرجح في المستوى الإحداثي نفسه، بينما تدور الأرض تحته؛ لذا يبدو لنا الأمر وكأن المستوى الإحداثي للبندول يدور، بينما نقف نحن ساكنين بلا حراك. إن البندول «يعرف»

موقعه — حسب مصطلحات بيركلي — بالنسبة إلى النجوم الثابتة، ويبقي نفسه ثابتًا مستقرًّا مقارنة بها وبالكون (كما نعلم في الوقت الحاضر) القابع خلف النجوم.

لكن كيف يعلم؟ ما التأثير الغامض الذي يمكن أن يصل عبر الفضاء ليؤثِّر في حركة المياه في دلو، أو بندول متأرجح، هنا على الأرض؟ نظرًا لعدم وجود إجابات على تلك الأسئلة، لم تلقَ فكرة بيركلي رواجًا واسعًا سواء في حياته أو خلال القرن ونصف قرن الذي أعقب مماته. لكنها انتعشت مرة أخرى في النصف الثاني من القرن التاسع عشر على يد إرنست ماخ، الفيزيائي الذي خُلِّد اسمه في العدد المستخدم لقياس السرعة بالنسبة إلى سرعة الصوت.



إرنست ماخ (وكالة ألامي).

وُلد ماخ عام ١٨٣٨ فيما كان يُعرف آنذاك بالإمبراطورية النمساوية المجرية. حصل على درجة الدكتوراه من جامعة فيينا، وأصبح أستاذًا في جامعة براغ في عام ١٨٦٧ قبل أن يعود إلى فيينا عام ١٨٩٥. وتُوفي في عام ١٩١٦، في العام الذي نشر فيه أينشتاين نظريته

العامة في النسبية، ولكن يوجد ما هو أكثر من تلك المصادفة التقويمية كي يرتبط بتلك النظرية. أثناء عمل ماخ في جامعة براغ عام ١٨٨٣، نشر كتابه «الميكانيكا» الذي ارتقى فيه بلغز الحركة المطلقة إلى مستوًى أعلى؛ إذ أنكر حقيقة كل من «الفضاء المطلق» أو «الزمن المطلق»، وكان لذلك أثر جوهري على أينشتاين وقت أن كان يضع النظرية العامة. كتب ماخ يقول إنه «[عندما] نقول إن جسمًا ما يحافظ على اتجاهه وسرعته «في الفضاء» من دون تغيير، فإن تأكيدنا هذا ليس سوى إشارة مختصرة إلى «الكون بأكمله».»[٥]

قبل أن نبحث في العلاقة بين تلك الفكرة وبين النظرية العامة، توجد نقطة أخرى مهمَّة ينبغي أن نتناولها. في الواقع يوجد نوعان من الكتلة. يدخل أحد النوعَين في معادلة نيوتن المتعلِّقة بالقوة والكتلة والتسارع. وهو عبارة عن قياس لمقدار مقاومة جسم يُدفَع، وتسمَّى كتلة القصور الذاتي. أمَّا النوع الثاني من الكتلة، فيحدِّد مدى قوة انجذاب جسم ما بفعل الجاذبية، ومدى قوة جذبه للأجسام الأخرى. وهذا النوع يسمَّى كتلة الجاذبية. تتناسب القوة التجاذبية للجذب بين جسمَين مع حاصل ضرب كتلتَي الجاذبية للجسمَين في بعضهما ثم قسمته على مربع المسافة بينهما، فيما يُعرف بقانون نيوتن للتربيع العكسي للجاذبية. الشيء المثير للاهتمام هو تساوي كلتا الكتلتَين؛ كتلة الجاذبية وكتلة القصور الذاتي لأي جسم. يمكن قياس كتلة الجاذبية لجسم ما عن طريق قياس قوة انجذابه بفعل الجاذبية (ببساطة بوزنه وهو منجذب إلى الأرض)، «أو» قياس كتلة القصور الذاتي عن طريق دفعه باستخدام قوة معروفة لمعرفة مدى سرعة تسارعه. وهذان الاختباران مستقلان بعضهما عن بعض تمامًا، ودائمًا ما يعطيان إجابة واحدة. وهذا يعني وجود علاقة قوية بين القصور والجاذبية. كما أنه شيء نرى تأثيره كل يوم؛ إذ إن تكافؤ الكتلتَين هو السبب في سقوط الأجسام بالسرعة نفسها.

اعتقد نيوتن أن كتلة القصور الذاتي أساسية في أي جسم. ففي كون فارغ غير هذا الكون، سيكون لجسم كروي واحد كتلة القصور نفسها التي يملكها في الكون الذي نعيش فيه. استنتج ماخ أن كتلة القصور الذاتي ناتجة عن «النجوم الثابتة»؛ أي بسبب وجود كل المادة الأخرى في الكون. فلو انتُزعت تلك النجوم، فلن يكون لتلك الكرة الأرضية المنعزلة كتلة قصور. وقاده هذا التفكير إلى استنتاج مثير للفضول، يتضمَّن الانتفاخ الاستوائي لكوكب الأرض الدوَّار.

في اللغة الدارجة يقال إن الانتفاخ الاستوائي ينتج عن قوة الطرد المركزي. كل علماء الفيزياء الذين يحترمون أنفسهم يكرهون هذا المصطلح؛ إذ لا يوجد شيء من هذا القبيل.

فهي «قوة خيالية» ناتجة عن الحركة الدائرية. ما يحدث في الحقيقة هو أن المادة على سطح الأرض بالقرب من خط الاستواء ستظل تتحرَّك في خط مستقيم لو لم تجذبها جاذبية الأرض إلى الداخل. تلك القوة الداخلية (القوة الجاذبة المركزية) هي التي تمنع الكوكب من الانشطار إلى أجزاء متفرِّقة، ولكن لو اخترع شخص ما آلة تلغي الجاذبية، فلن تطير الآلة إلى الخارج مثل سفينة الفضاء التي صنعها كافور في رواية إتش جي ويلز «أول رجال على القمر»، بل ستنحرف بعيدًا فوق نقطة تماس إلى سطح الأرض. ولو كان الكوكب يدور بسرعة كافية بحيث تنفصل الأجزاء عن خط الاستواء، كان هذا ما سيحدث لها. وأفضل تفسير للانتفاخ الاستوائي هو تفسيرها في إطار طاقة هذه الحركة وطاقة الجاذبية التي تنطوي عليها، ولكن نظرًا لأنني لا أريد الانجراف نحو تلك التفاصيل، ولأنني أفتقر إلى احترام الذات، سأرتضي باستخدام مصطلح قوة الطرد المركزي هنا. ما يهم هو أن الأرض تنتفخ عند خط الاستواء وهذا بسبب دورانها. وهنا كان الموضع الذي تدخَّل عنده ماخ مفسدًا كل شيء دون قصد. فما يهم هو الدوران «النسبي» على حد قوله. لا يهم إن كانت الأرض تدور والنجوم ساكنة، ولا إن كانت الأرض ساكنة والنجوم تدور حولها. ففي كلتا الحالتَين سيحدث انتفاخ استوائي. وعلى حد تعبيره «لا يهم إن كنا نعتقد أن الأرض تدور في مدارها أو تبقى ساكنة، بينما تدور النجوم الثابتة حولها». انتهز أينشتاين هذه الحزمة من الأفكار وأطلق على فكرة أن كتلة القصور هي نتاج وجود كل شيء في الكون مصطلح «مبدأ ماخ». لكن تلك الفكرة لم يستسِغها الجميع؛ فقد استنكرها كل من فلاديمير أليتش أوليانوف (المعروف أيضًا باسم لينين) وبرتراند آرثر وويليام راسل.

يعتبر مبدأ التكافؤ — أي تطابق كتلة الجاذبية وكتلة القصور — أحد المحاور الأساسية في النظرية العامة للنسبية، وحاول أينشتاين أن يجعل مبدأ ماخ جزءًا من النظرية. فذهب إلى أن وجود هذا التطابق بين كتلة الجاذبية وكتلة القصور يرجع إلى أن قوى القصور الذاتي نفسها هي في الأصل قوى جاذبية.

يسهل طرح حجة غامضة دعمًا لهذه الفكرة (وهو ما يسمِّيه علماء الفيزياء لأسباب واضحة «حجة التلويح»). تعمل الجاذبية في اتجاهَين (بل في كل الاتجاهات، وهو المهم حقًّا). الأرض تجذب الإنسان إليها، ولكن الإنسان أيضًا يجذبها إليه. الأرض تجذب القمر، ولكن القمر أيضًا يجذب الأرض إليه؛ ومِن ثَم يدور كلاهما حول مركز الكتلة المشترك بينهما الذي يقع على مسافة ١٧٠٠ كيلومتر تحت سطح كوكبنا، وليس في مركزها. إذا

كانت «النجوم الثابتة» تصل بشكل أو بآخر إلى جسم هنا على الأرض باستخدام أصابع الجاذبية للتأثير في حركته، فمن المرجَّح إذن أن لذلك الجسم تأثيرًا مطابقًا يصل إلى تلك النجوم. عندما نحاول تحريك شيء ما عن طريق تدويره أو تسريع حركته في خط مستقيم، فإنه يتحرَّك عبر شبكة الجاذبية الكونية ويربكها مثل ذبابة تحاول الخلاص من شبكة عنكبوت. عندئذٍ لا بد أن تكون النتيجة تشويشًا ينتشر عبر الشبكة ويعود إلى النجوم (أو المجرات، من منظور أحدث) التي تعيد إرسال شيء أشبه برد فعل، أقرب إلى مصافحة كونية، في محاولة للحفاظ على الوضع الراهن ومقاومة التسارع وإنتاج القصور الذاتي.

تبدو الفكرة جيدة إلى أن نتذكَّر أنه لا توجد إشارات يمكنها التنقُّل أسرع من الضوء. إذا دفعتُ القلم على مكتبي، فإنه «يعلم» على الفور أنني أدفعه، ويعلم مقدار المقاومة التي ينبغي إبداؤها لتلك الدفعة. أمَّا الإشارات التي تتحرَّك إلى الخلف والأمام عبر الفضاء الفارغ الذي تحدَّث عنه نيوتن، فلن تفي بالغرض. لكن صورة أينشتاين للزمكان بوصفه نسيجًا مرنًا رباعيَّ الأبعاد تُغيِّر فيه المادة شكل الفضاء، وتلك التغييرات في شكل الفضاء تخبر الأجسام المادية كيف تتحرَّك، فتعطينا تصوُّرًا مختلفًا، وطريقة لحل اللغز باستخدام معادلات النظرية العامة، بدلًا من مجرَّد التلويح بأيدينا بطريقة غامضة.

عندما كان أينشتاين يبحث عن نظرية للجاذبية، قرَّر منذ البداية أن يكون مبدأ ماخ جزءًا طبيعيًّا من النظرية العامة. عندما يأتي أناس مثلي يصفون سلوك الأجسام مثل النجوم النيوترونية الثنائية من حيث الانبعاجات في نسيج الزمكان، فإننا نتجاهل بقية الكون، ونزعم أن النجوم يدور بعضها حول بعض في زمكان ذي خلفية مسطَّحة بالكامل. لكن الزمكان في أي موقع — في الأساس — يتأثَّر بجاذبية كل جسم مادي في الكون؛ لأن نطاق الجاذبية ليس له حد معيَّن. يوجد أيضًا تأثير خفي وغالبًا ما يُتجاهَل يلعب دورًا هنا. إذا وضعنا وزنًا ثقيلًا مثل كرة بولينج على لوح مرن مشدود مثل الترامبولين، فإنه يُحدث انبعاجًا واحدًا. وإذا أزحنا الكرة ووضعنا أخرى في جزء مختلف من اللوح، فستُحدث انبعاجًا مختلفًا. ولكن إذا وضعنا الكرتَين معًا، فلن يكون نمط الانحدارات الناتج مثل النمط الذي ينتج عن جمع الانحدارَين المنفصلَين معًا؛ ذلك أننا عندما نضيف الكرة الثانية، فإننا نضعها على لوح تغيَّر شكله بالفعل بفعل وجود الكرة الأولى. فَلْنتخيَّل التعقيدات في شكل الزمكان الذي تسبِّبه إضافة تأثيرات كل جسم مادي في الكون. ومِن ثَم فإن شكل الزمكان الذي تتحرَّك فيه النجوم النيوترونية الثنائية — أو أي أجسام — ليس أرضية لعب مستوية على الإطلاق من منظور الزمكان.

ينبغي أن تتضمَّن معادلات النظرية العامة في النسبية تأثيرات كل الكتل البعيدة التي تقاس عليها عمليات التسريع وقوى القصور وعمليات الدوران. وهي كذلك بالفعل. ولكن ثمة انحرافًا هنا. إن معادلات أينشتاين لا ينتج عنها سوى تأثيرات ماخ الصحيحة في نوع واحد من العالم ألَا وهو النوع الذي ينغلق فيه الكون. وظل البعض عقودًا من الزمن ينظرون إلى ذلك باعتباره خللًا في نظرية أينشتاين؛ لأن علماء الفلك كانوا يعتقدون أن الكون مفتوح، بالمعنى الوارد في الاحتمال المستبعد الثالث. لكن الكون ينبغي أن يكون مغلقًا «فحسب». ومن الممكن أن يكون أقرب إلى التسطُّح كما تود أن يكون، بشرط أن يكون على الجانب المغلق من الخط الفاصل. وتتناغم الفكرة الحديثة للتضخُّم والأدلة الواردة من الدراسات التي أُجريت على إشعاع الخلفية عن أن الكون يقترب من التسطُّح على نحو غير واضح تناغمًا تامًّا مع هذا الشرط الذي تضعه النظرية العامة. وبدلًا من أن يكون الشرط عيبًا، أصبح انتصارًا في الحقيقة!

هناك ما هو أفضل؛ إذ توجد بعض الأدلة التجريبية على أن ذلك النوع من التأثير في الزمكان الذي تنبَّأت به الأجزاء التي ساهم بها ماخ في النظرية العامة حقيقي. فبمجرَّد نشر النظرية العامة، استخدم اثنان من المُنظِّرين معادلات النظرية لمعرفة كيف يمكن للتركيزات الموضعية للمادة — من حيث المبدأ — أن تُنتج مكافئًا موضعيًّا لتأثير ماخ، ويسمَّى سحب الإطار المرجعي. في إحدى النسخ المعدلة لهذه الفكرة تتخيَّل أن جسمًا ما قد وُضع داخل قوقعة دائرية كبيرة ومستوية تمامًا من المادة، وأن هذه القوقعة صُنِعت بحيث تدور بالنسبة إلى المجرات البعيدة. إذا كان مبدأ ماخ صحيحًا بعدما أُدرج في النظرية العام للنسبية، فإن الجسم داخل القوقعة ينبغي أن يشعر بقوة صغيرة تحاول سحبه للدوران مع القوقعة. في نسخة أخرى من الفكرة، توضِّح المعادلات أنه بالقرب من كتلة دوَّارة مثل الأرض، لا بد أن يكون هناك تأثير طفيف لسحب الإطار أيضًا. أُجريت الحسابات التي تتضمَّن سحب الإطار للمرة الأولى عام ١٩١٨، وذلك في إطار النظرية العامة في النسبية على يد عالِمَي الفيزياء النمساويَّين جوزيف لينس وهانز ثيرينج، ولكن التأثيرات التي تنبَّآ بها كانت محدودة للغاية، لدرجة أنه لا أحد توقَّع قياس تأثير لينس-ثيرينج على الإطلاق. لكن على غير المتوقَّع قِيسَ.

في عام ٢٠٠٤ أُطلق القمر الصناعي «مسبار الجاذبية بي» في داخل مداره حول الأرض، حاملًا أربعة أجهزة جيروسكوب في شكل كرات في حجم كرة تنس الطاولة تقريبًا، كل كرة مستديرة استدارة تامة لدرجة أقل من ١٠ نانومترات، ما يعني أنه لم تكن هناك

حالات عدم انتظام أكبر من ٤٠ ذرة ارتفاعًا. بمراقبة دوران أجهزة الجيروسكوب، قاس القائمون على التجرِبة من جامعة ستانفورد، تأثير سحب الإطار بقيمة ٣٧٫٢ ± ٧٫٢ مللي ثانية قوسية في السنة، مقارنة بالقيمة التي تنبَّأت بها النظرية العامة وهي ٣٩٫٢ مللي ثانية قوسية في السنة. ولم يكن هذا الانتصار سوى واحد من إنجازات القمر الصناعي مسبار الجاذبية بي، ولكن قصته تستحق أن يُفرد لها كتاب آخر. المهم هنا أن التنبؤ قد ثبتت صحته، ما يشير إلى صحة مبدأ ماخ. ولكن قبل أن أترك قصة نيوتن والأسقف والدلو والكون، أود أن أُشير إلى تنبؤ لم يُطرح البتة، لكن لو طُرح لكان من الممكن أن يشير إلى صحة مبدأ ماخ منذ مائة عام.

تحاشَيت أن أتناول مصطلحَي «النجوم الثابتة» و«المجرات البعيدة»؛ لأنه حتى عشرينيات القرن العشرين كان ثمة اعتقاد بأن ما نعرفه الآن باسم مجرة درب التبانة — وهي جزيرة في الفضاء تحتوي على مئات المليارات من النجوم — هي الكون بأكمله. وبعد ذلك تبيَّن أننا نعيش في قرص مسطح من النجوم، وأن ثمة جزرًا أخرى مشابهة (بعضها على شكل قرص وبعضها غير ذلك) خلاف مجرة درب التبانة. وأخيرًا ثبت أن مجرة درب التبانة هي عبارة عن مجرة متوسِّطة الحجم تمامًا، مثل المجرات التي تتخذ شكل قرص، ما جعلها مجرة نمطية في فئتها (لكن لم يُعلَن عن ذلك حتى نهاية القرن العشرين).[٦] إننا نعيش في جزء عادي من الكون. عند ذلك، ثبت أيضًا أن الكون يحتوي على مئات المليارات من المجرات الأخرى. لم يكن من الممكن أن يتنبَّأ بذلك. أم كان ممكنًا؟

على الرغم من أن علماء الفلك الأوائل درسوا حزام الضوء عبر السماء الذي نسمِّيه درب التبانة، واستنتجوا أننا نعيش في نظام نجمي يشبه عجلة الطاحونة أو حجر الجلخ، لم يتمكَّن العالم الأمريكي هارلو شابلي من ترسيخ ذلك على أساس علمي ثابت إلا في نهاية العقد الثاني من القرن العشرين، وذلك باستخدام أقوى تلسكوب في العالم، وهو التلسكوب العاكس ١٠٠ بوصة، والموجود في مرصد جبل ويلسون بكاليفورنيا. كان الأمر سيتطلَّب أجهزة تلسكوب أكبر وأفضل لتحديد المجرات الأخرى. لكن لو كان شابلي من أنصار مبدأ ماخ، لربما تمكَّن من استنتاج وجودها.

بحلول عام ١٩٢٠، بات واضحًا أن مجرة درب التبانة عبارة عن قرص مسطَّح يتكوَّن من عدد لا يُحصى من النجوم المنفصلة. لماذا المجرة مسطحة؟ ليس لأنها جسم صلب مثل حجر الجلخ، بل لأنها تدور. كيف تعرف المجرة أنها تدور؟ يوضِّح لنا مبدأ ماخ أن السبب

في ذلك هو حتمية وجود توزيع ما للمادة — بعد مجرة درب التبانة بمسافة بعيدة — ما يوفِّر إطارًا مرجعيًّا يقاس عليه دوران مجرتنا. وسيكون التخمين الطبيعي حينذاك أنه إذا كانت مجرة درب التبانة عبارة عن جزيرة من النجوم، فلا بد أن الكون مليء بجزر أخرى من النجوم؛ أي مجرات أخرى. لو أن أحدًا قد أدرك تلك الصلة آنذاك، لربما لم يكن عمل إدوين هابل وغيره من العلماء الذي أثبت وجود مجرات أخرى وعن حجم الكون مفاجأة كبرى، ولاعتُبر أنه تأكيد على دقة كل من مبدأ ماخ والنظرية العامة في النسبية.

لم يحدث الأمر على هذا النحو مطلقًا، ولكنه أمر يدعو إلى التفكير في المرة القادمة التي تقلب فيها الكريمة في كوب القهوة. فعندما تفعل ذلك، ترتفع القهوة قليلًا عند جوانب الكوب وتهبط قليلًا في المنتصف. والاحتمال المستبعد هو أن القهوة تفعل ذلك لأنها تشعر بتأثير مئات الملايين من المجرات التي تبعد عنا بمئات الملايين من السنين الضوئية.

هوامش

(١) يعيد هذا الجزء النظر في بعض الأفكار التي طُرحت في الطبعة الأولى من كتابي «بحث عن الانفجار العظيم»، ولكنها لم تُطرح في الطبعات اللاحقة؛ إذ اعتُبرت انحرافًا مفرطًا عن الموضوع الأساسي للكتاب. ولكن بفضل المراجعة الملائمة، تبدو مناسبة تمامًا للطرح هنا.

(٢) ترجمة نيوتن والاستشهاد المقتبس من بيركلي الوارد أدناه مأخوذَين من كتاب «وحدة الكون»، تأليف دينيس سياما، دار نشر فابر وفابر، لندن، ١٩٥٩.

(٣) ثمة نقطة مهمة. لقد نفَّذ نيوتن التجرِبة بالفعل، ولم تكن مجرَّد «تجرِبة فكرية» خيالية.

(٤) سميت مدينة بيركلي بولاية كاليفورنيا، نسبة لاسمه تكريمًا له.

(٥) التأكيد هنا مِن وضْعِه.

(٦) انظر «ذا أوبزيرفاتوري»، المجلد رقم ١١٨، الصفحات ٢٠١–٢٠٨ (١٩٩٨).

الاحتمال المستبعد السادس: القوانين البسيطة تصنع أشياء معقَّدة، أو الأشياء الصغيرة تعني الكثير

تناول الاحتمالان المستبعدان السابقان تأثير الأجسام الكبيرة على الأجسام الصغيرة. فالأحداث التي تنطوي على قدر هائل من الطاقة، والتي تقع في الفضاء السحيق وتُنتج حركات ضئيلة للأجسام في الأرض، والكون المادي بأكمله، يخبران الأجسام الصغيرة كيف تقاوم الحركة. لكن الأجسام الصغيرة أيضًا يمكن أن يكون لها تأثير كبير على العالم عمومًا. ربما سمعت عن «تأثير الفراشة»، وهو مصطلح يُساء استخدامه مثل مصطلح «القفزة النوعية».[1] لكن الحقيقة المستبعدة عن تأثير الفراشة أعمق بكثير من المفهوم المغلوط الشائع.

منذ زمن إسحاق نيوتن وحتى القرن العشرين، كان الكون يبدو مكانًا منظَّمًا يمتثل لقوانين بسيطة بطريقة حتمية. فقد أخبرتنا قوانينه الشهيرة كيف تتحرَّك الأجسام عندما تشعر بقوة ما، وشرحت مدارات الكواكب، والنجوم في الأساس. وأدَّى هذا إلى تشبيه الكون بآلية عمل الساعة، حيث تُملأ الساعة في البداية وتوضع عبر مسار صارم يمكن التنبُّؤ به في المستقبل. ولكن منذ عصر نيوتن نفسه، عُرِف أن تلك الصورة بها معضلة، غالبًا ما كانت تُقابَل بالتجاهل على أمل أن تُحل يومًا ما. تتعلَّق هذه المعضلة بالجاذبية والمدارات وتسمَّى «معضلة الأجسام الثلاثة»، على الرغم من أنها تنطبق على سلوك أي مجموعة من الأجسام التي تتفاعل بالجاذبية وتتكوَّن من أكثر من عنصرَين.

تكمن المعضلة في أنه على الرغم من أن قوانين نيوتن تتيح لنا حساب مدارات جسمَين أحدهما حول الآخر تحت تأثير الجاذبية بدقة مطلقة، فإنها لا تقدِّم حلولًا دقيقة للمسائل

التي تتضمَّن ثلاثة أجسام متجاذبة أو أكثر. يمكننا تقدير مدار القمر بالنسبة إلى الأرض عن طريق تجاهل أي أجسام أخرى، ويمكننا تقدير مدار الأرض حول الشمس بالطريقة نفسها، ولكن لا يمكننا تقدير سلوك نظام الأرض والقمر والشمس[٢] في المجمل، فضلًا عن بقية المجموعة الشمسية والكون ككل. لا يمكن تقدير ذلك «من حيث المبدأ»؛ لأن الأمر لا يتعلَّق بصعوبة حل المشكلة فحسب. فيقال إن المعادلات ذات الصلة ليست متكاملة، أو ليس لها حلول تحليلية.

يمكننا التحايل على المشكلة أحيانًا باستخدام التقديرات التقريبية. في هذا المثال، نفترض أن الأرض لا تتحرَّك، ونقوم بحساب كيفية تحرُّك القمر في مدة زمنية قصيرة، ثم نتجاهل القمر ونحسب المسافة التي قطعتها الأرض في تلك المدة تحت تأثير جاذبية الشمس، ونحسب الخطوة التالية في مدار القمر، وهكذا في سلسلة خطوات متكرِّرة (التكرارية). لكن في كل خطوة، يتأثَّر القمر أيضًا بالشمس، ولن يكون في المكان نفسه الذي كان فيه عند إجراء العملية الحسابية السابقة. وماذا عن تأثير القمر على الشمس والأرض؟ في هذا المثال، تكون كتلة الشمس أكبر بكثير من كتلة الكواكب لدرجة تجعل التقدير التقريبي صالحًا للغاية لتحديد مدارات الكواكب والأجسام الأصغر في المجموعة الشمسية، لكن إن كانت كتلة الأجسام الثلاثة جميعها متساوية تقريبًا، فلا يمكن حل المسألة بالتحليل مطلقًا. بيت القصيد هنا هي أنه بسبب عدم وجود حلول تحليلية للمعادلات، فإن الكون نفسه لا «يعلم» كيف سيتغيَّر نظام الأجسام الثلاثة بمرور الوقت.

مثل هذه الأمور لن يكون لها أهمية إذا كانت الأخطاء الصغيرة في الحساب تؤدِّي دائمًا إلى فروق صغيرة في النتيجة النهائية. لكن لا يدوم الوضع على هذه الحال، وذلك هو نصف قصة الفوضى. فنظام تؤدِّي فيه الاختلافات البسيطة في الظروف الأولية إلى اختلافات بسيطة في سلوكه فيما بعد يقال عنه إنه نظام خطي، ولكن نظامًا تؤدِّي فيه الاختلافات البسيطة في الظروف الأولية إلى اختلافات كبيرة في وقت ما في المستقبل يقال عنه «نظام حساس للظروف الأولية» وغير خطي. وقد لخَّص عالم الرياضيات الفرنسي هنري بوانكاريه الموقف في أوائل عام ١٩٠٨ في كتابه «العلم والفرضية» حيث قال:

> هناك سبب صغير للغاية يغيب عن ناظرنا يحدِّد تأثيرًا كبيرًا لا يمكننا التغافل عن رؤيته، ثم نقول إن التأثير يعزو إلى الصدفة. لو كان لدينا دراية دقيقة بقوانين الطبيعة وموقف الكون في اللحظة الأولى، لأمكننا التنبُّؤ بدقة بموقف ذلك الكون نفسه في لحظة لاحقة. لكن حتى لو كان الوضع أن القوانين الطبيعية

> لم تَعُد سرًّا علينا، لربما ظللنا لا نعرف الوضع الأوليِّ سوى على نحو «تقريبي». وإذا مكَّننا هذا من التنبُّؤ بالوضع اللاحق بـ «التقدير التقريبي»، فهذا كل ما نحتاج إليه، وحينها ينبغي القول إن الظاهرة قد تُنبِّئ بها، وأنها محكومة بقوانين. لكن الوضع ليس كذلك على الدوام؛ فقد يتصادف أن تؤدِّي اختلافات بسيطة في الظروف الأولية إلى اختلافات كبيرة للغاية في الظاهرة النهائية. خطأ صغير في الأولى سيكون من شأنه أن يؤدِّي إلى خطأ كبير في الأخيرة. ومِن ثَم يصبح التنبُّؤ مستحيلًا.

ثمة مثال بسيط للغاية يوضِّح تلك النقطة. على قمة جبال روكي بأمريكا الشمالية، يوجد حد فاصل، عبر خط طويل يسمَّى الفاصل القاري، يحدِّد الحدود الجغرافية بين الشرق والغرب. تتدفَّق مياه الأمطار التي تسقط على شرقي الخط في نهاية المطاف إلى خليج المكسيك أو المحيط الأطلسي؛ أمَّا مياه الأمطار التي تسقط غربي الخط فتتدفَّق إلى المحيط الهادئ. فوق الخط مباشرة، لا بد أن هناك أماكنَ بها فرق أقل من سنتيمتر واحد في الموضع الذي تسقط فيه قطرة مطر من شأنه أن يحدِّد مصيرها. قطرتان تسقطان من سحابة واحدة في وقت واحد قد تفرِّق بينهما مسافة أقل من سنتيمتر واحد. قطرة ينتهي بها المطاف إلى المحيط الأطلنطي، والأخرى تسير آلاف الأميال حتى تصب في المحيط الهادئ. فمصير قطرة المطر تحدِّده الظروف الأولية. لكن هناك المزيد. المحيطان إلى الشرق وإلى الغرب يبدو أنهما يجذبان قطرات المطر، ومفهوم الجاذب — المرتبط بأفكار عن التوازن — هو النصف الآخر من قصة الفوضى.

مثال آخر بالبساطة نفسها لكنه مألوف أكثر لجاذب يمكن رؤيته عن طريق دحرجة كرة زجاجية في وعاء خلط له قعر دائري. بعد بضع مرات من الصعود والهبوط، تستقر الكرة الزجاجية في قعر الوعاء في اتزان في حالة تماثل أقل قدر من الطاقة في ذلك النظام. تلك الحالة جاذبة للنظام. لكن قد لا تكون هناك نقطة فريدة مرتبطة بالجاذب. لنأخذ الكرة الزجاجية نفسها ونحاول أن نضعها في اتزان على قمة قبعة مكسيكية مدبَّبة. ستسقط ويستقر بها المقام في التجويف الذي تصنعه الحافة المقلوبة إلى أعلى، لكن كل النقاط حول ذلك التجويف توازي حالة الطاقة الكامنة الدنيا نفسها (ويُعرَف هذا المثال في المجال باسم جهد «القبعة المكسيكية»). فالتجويف بأكمله عبارة عن جاذب واحد.

في هذَين المثالَين البسيطَين، نتناول الأنظمة التي ينتهي بها المطاف إلى حالة من التوازن من دون أن يتغيَّر فيها شيء. ترتبط هذه الفكرة بفكرة الإنتروبيا وهو قياس لمقدار

النظام في نظام ما، حيث تتزامن زيادة الاضطراب مع زيادة الإنتروبيا. تنزع الأنظمة المغلقة — التي تمثِّل جزءًا مقتطعًا من العالم الخارجي — بطبيعتها إلى زيادة الإنتروبيا تبعًا لزيادة الاضطراب. في المثال الكلاسيكي المعروف، إذا كان لدينا صندوق مقسَّم إلى نصفَين، وملأنا أحدهما بالغاز، وتركنا الآخر فارغًا، ثم أزلنا الحاجز الفاصل بينهما، سينتشر الغاز ليملأ الصندوق كله بالتساوي. هنا يقل النظام؛ لأنه لم يَعُد هناك أي فرق بين نصفَي الصندوق. ربما تكون قد فهمت فكرة الإنتروبيا في هذا المثال وتعلمت منه أن الأنظمة تنجذب إلى حالات الإنتروبيا القصوى. لكن في العالم الحقيقي، لا يوجد ما يُعرف بنظام معزول تمامًا. فدائمًا ما يكون هناك اتصال بالعالم الخارجي، وهذا الاتصال يغيِّر الأشياء بصورة ملحوظة.

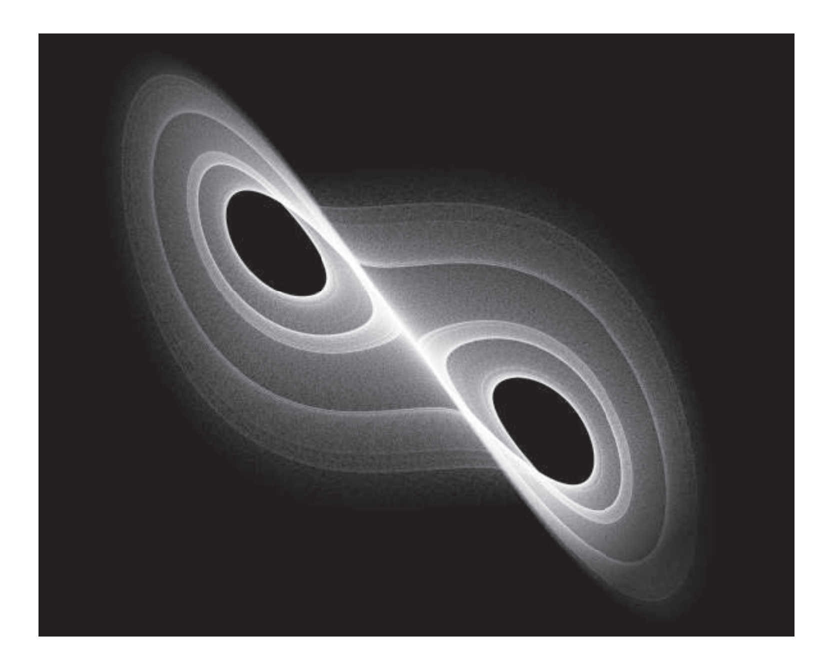
إذا ملأت وعاءَين بمزيج من غازَين (النسخة الكلاسيكية من التجرِبة يُستخدم فيها مزيج من غاز الهيدروجين وكبريتيد الهيدروجين) وربطتهما بأنبوب ضيِّق، فسيصبح هناك خليط موحَّد من الغازَين في كل حاوية، وهكذا تكون الإنتروبيا في أقصى درجاتها في النظام. لكن إذا حُفظ أحد الوعاءَين في درجة حرارة أعلى قليلًا من الآخر، ستتركَّز الجزيئات الأخف (جزيئات الهيدروجين في هذا المثال) في الوعاء الأكثر سخونة، بينما ستتركَّز الجزيئات الأثقل (كبريتيد الهيدروجين في هذا المثال) في الوعاء الأبرد. لقد أدَّى هذا إلى خلق نظام، ومِن ثَم انخفض مستوى الإنتروبيا. فانحراف بسيط عن نقطة التوازن من شأنه أن يغيِّر سلوك نظام بالكامل، وفي العموم ينجذب النظام القريب من نقطة التوازن، ولكنه ليس في حالة توازن بالفعل إلى حالة يكون فيها معدَّل تغيُّر الإنتروبيا في أقل مستوياته. بعبارة أبسط، لا تحدث الأشياء المثيرة للاهتمام إلا بالقرب من نقطة التوازن، وعندما يوجد تدفُّق للطاقة عبر النظام. ولا تحدث أي تغيُّرات عند نقطة التوازن بالضبط. أمَّا عند الابتعاد عن نقطة التوازن، فلا يتوقَّف أي شيء عن التغيُّر بطريقة فوضوية. ليس من قبيل الصدفة أننا نعيش على كوكب يغمره دفق من الطاقة المنبعثة من الشمس، ومليء بالأشياء المثيرة للاهتمام، وفيها نحن. فالحياة تقف على «حافة» الفوضى.

يمكن رؤية الانتقال من نظام منظَّم لا يحدث فيه أي شيء جديد بالملاحظة مرورًا بحالة تحدث فيها تعقيدات مثيرة للاهتمام، وصولًا إلى حالة من الفوضى في مثال من الواقع. في نهر تتدفَّق مياهه بلطف حيث تبرز صخرة واحدة فقط فوق سطح الماء، ينقسم تدفُّق المياه حول الصخرة، ثم يتصل مجدَّدًا بسلاسة على الجانب الآخر. يمكننا مراقبة تدفُّق الماء عن طريق إسقاط رقائق صغيرة من الخشب عند المنبع ومتابعتها وهي تمر من

جانب الصخرة. إذا زاد تدفُّق المياه تدريجيًّا، فربما يكون السبب غزارة الأمطار عند المنبع، ما يعني حدوث تغيُّر في النمط. في البداية، تحدث دُوَّامات صغيرة في اتجاه مصب النهر من عند الصخرة. تبقى الدُّوَّامات في مكانها، وتظل رقائق الخشب المحصورة داخلها تدور وتدور على نحو متكرِّر. فالدُّوَّامات نوع من الجواذب. ولكن مع استمرار زيادة تدفُّق المياه، تتسع المسافة بين الدُّوَّامات والصخرة، ويحملها تيار النهر محتفظة بشكلها لمدة من الزمن قبل أن تتحلَّل في تيار المياه بصفة عامة. وتتشكَّل دُوَّامات جديدة مكانها وتنطلق بدورها. لكن مع زيادة تدفُّق المياه أكثر، ويزداد صغر المساحة خلف الصخرة التي تتكوَّن فيها التيارات وتبقى. وفي النهاية، تصبح حتى المياه خلف الصخرة مباشرة مضطربة وتتحرَّك بطريقة غير منتظمة وفوضوية، والنظام الفوضوي بحق لا توجد فيه جواذب. كل هذا حدث تبعًا لتغيير في شيء واحد، ألَا وهو سرعة تدفُّق المياه. يختلف سلوك النظام نفسه تمامًا إذا كان قد حدث تغيير في شيء واحد، يتعلَّق بالنمذجة الرياضية للنظام، تغيير في عدد واحد فقط. الأمر الذي يقودنا إلى تلك الفراشة وتأثير أجنحتها المرفرفة.

تعود القصة إلى عام ١٩٥٩، حين كان إدوارد لورينز عاكفًا على إعداد نموذج للغلاف الجوي باستخدام الكمبيوتر كخطوة نحو التنبُّؤ بالأحوال الجوية باستخدام الكمبيوتر. وفي سبيل ذلك استخدم فكرة إمكانية «تشغيل» مجموعة من المعادلات التي تصف حالة الطقس على الكمبيوتر من أجل التنبُّؤ بحالة الطقس لأيام أو أسابيع قادمة، ورجا من تلك المعادلات أن توضِّح أن ثمة استقرارًا في أنماط معيَّنة للطقس، ومِن ثَم يسهل التنبُّؤ بها. وفي الوقت الحاضر، نُطلق على هذه الحالات المستقرة جواذب. بالطبع لم تكن أجهزة الكمبيوتر التي اضطُر إلى استخدامها آنذاك بقوة الأجهزة التي نستخدمها اليوم، ولكنه في الواقع لم يكن يحاول التنبُّؤ بحالة الطقس في العالم الواقعي، بل فقط كان يختبر الآلية التي تعمل بها هذه الفكرة على نطاق محدود (وهو ما يسمِّيه العلماء «نموذج اللعبة»). كانت مُدخلات النموذج مجرَّد قائمة من الأعداد تمثِّل أشياء مثل درجة الحرارة والضغط، وكان الناتج عبارة عن قائمة مماثلة أمكن تحويلها بعد ذلك إلى «تنبُّؤ جوي» مصغَّر.

عندما شغَّل لورينز النموذج مرتَين باستخدام مجموعة البيانات المدخلة نفسها كما كان يعتقد، فوجئ حين حصل على توقُّعات مختلفة تمامًا في المرتَين. وتبيَّن أن الاختلاف نتج عن تغيير طفيف في الأعداد المدخلة؛ ففي المرة الأولى، استخدم ستة أعداد معنوية (وكانت في هذا المثال ٠٫٥٠٦١٢٧) وفي المرة الثانية طُبِع الرقم في صورة مختصرة من الرقم السابق مقرب إلى ثلاثة أرقام (في هذا المثال ٠٫٥٠٦). لم يكن الاختلاف النموذجي في



يمثل مخطط «الفراشة» هذا المستقبل المحتمل لنظام ما (مثل نظام الطقس) يقف في توازن على الخط الفاصل بين «حالتين». إن وكزة صغيرة جدًّا كفيلة بإرساله إلى دوامة من الدوامتين أو الأخرى. فهو نظام «حسَّاس للظروف الأولية». (ساينس فوتو ليبراري).

كل من الرقمَين اللذَين أُجريت بهما المعادلات يتجاوز ربعًا من عشر من واحد بالمائة، ولكنه غيَّر نتيجة التنبُّؤات تمامًا. ولو كان الغلاف الجوي حسَّاسًا دائمًا إلى تلك الظروف الأولية، فهذا من شأنه أن يجعل التنبُّؤ بحالة الطقس باستخدام الكمبيوتر مهمة مستحيلة. لكن ما يحدث بات يتضح بالتدريج، وهذا يفسِّر سبب ثقة العاملين في الأرصاد الجوية اليوم في تنبُّؤاتهم بحالات الطقس في بعض الأحيان، بينما في أحيان أخرى يفضِّلون إخفاء تنبؤاتهم. والطريق إلى وصف ما يجري يكمن في نوع من المشاهد الطبيعية الخيالية يسمِّيه علماء الفيزياء فضاء الطور.

يشبه فضاء الطور مشهدًا حقيقيًّا لمنطقة ريفية ممتدة على مرأى البصر بها تلال ووديان وجبال عالية وحفر عميقة. كل نقطة على الأرض تتطابق مع خصائص فيزيائية تنتمي إلى النظام محل البحث. لذا إذا كنا نمثِّل الغلاف الجوي، فنقطة واحدة على المشهد ببساطة لا تتطابق مع خاصية واحدة مثل درجة الحرارة، بل مع مجموعة معيَّنة من

الخصائص تتكوَّن من درجة الحرارة والضغط وخصائص أخرى. تمثِّل قمة الجبل حالة مستبعدة إلى أقصى حد للغلاف الجوي، بينما الحفرة العميقة تمثِّل حالة جذب شديدة. أمَّا بدء نموذج محاكاة حاسوبي فيماثل سكب الماء في نقطة معيَّنة من المشهد. وطبقًا للمعادلات التي يتم إدخالها في النموذج، تنحدر المياه إلى سفح التل وتنجذب إلى الحفر العميقة. هذه هي الحالات الأكثر ترجيحًا للنظام. ولكن قد يكون للمياه فرصة لاختيار المسارات التي تتدفَّق فيها، مثل قطرات الأمطار التي تسقط على قمم جبال روكي، ومِن ثَم قد يتحدَّد مصيرها بالظروف الأولية. فتحوُّل طفيف في نقطة البداية قد يؤدِّي إلى تحوُّل كبير في نقطة النهاية. تسمَّى المسارات التي يمكن اتباعها في هذا الطريق بخطوط السير، والنقاط على طول خط السير تمثِّل التنبُّؤات في أوقات مختلفة في المستقبل. سينتهي خط السير النموذجي في فضاء الطور في إحدى البرك أو الحفر المائية، وستظل المياه تدور كدوران المياه في الدُّوَّامات التي تتشكَّل خلف صخرة في نهر جارٍ. لكن إذا كان هناك حفرتان يفصل بينهما حاجز ضحل، مثل شريط رملي، فقد يُقطَع خط السير في بعض الأحيان (وعلى نحو غير متوقَّع)، ويبدأ في الدوران حول الحفرة الأخرى. وبذلك تكون المياه قد انتقلت من جاذب إلى آخر. في العالم الواقعي، يوازي هذا الأمر حدوث تغيُّر في الغلاف الجوي من حالة إلى أخرى.

ما اكتشفه علماء الأرصاد الجوية بعد عقود من اكتشاف لورينز أن الطقس يتأثَّر أحيانًا بالظروف الأولية ولا يتأثَّر في أحيان أخرى. وفي الوقت الحاضر، لا يُجري علماء الأرصاد الجوية عملية محاكاة واحدة مبتدئين بالأرقام المطابقة لحالة الطقس اليوم في محاولة للتنبُّؤ بحالة الطقس لأيام مقبلة. بل إنهم يُجرون عملية المحاكاة نفسها عدة مرات مع تغيير طفيف في الظروف الأولية. وفي بعض الأحيان، تعطي تلك العمليات جميعها إجابة واحدة تقريبًا. كل خطوط السير تقصد الحفرة نفسها وتدور داخلها. ولكن في بعض الأيام، تعطي نماذج المحاكاة مجموعة من الإجابات المختلفة كما حدث مع لورينز عام ١٩٥٩. في تلك الحالة، يستحيل التوصُّل إلى تنبُّؤ دقيق. ولا يعزو ذلك إلى خطأ من علماء الأرصاد الجوية أو نماذجهم، ولكن لأن هذا هو العالم؛ فالغلاف الجوي في ذلك الوقت يكون في حالة تتأثَّر بالظروف الأولية.

من هنا يأتي تأثير الفراشة. طرح لورينز النقاش حول تلك النقطة في اجتماع عُقد في واشنطن عام ١٩٧٢، حيث تساءل: «هل رفرفة أجنحة فراشة في البرازيل من شأنها أن تُطلق إعصارًا في تكساس؟» على الرغم من أن هذا المثال بالذات ليس في محله؛ لأن البرازيل

وتكساس تقعان في نصفَين مختلفَين من الكرة الأرضية، وأنظمة الطقس على جانبَي خط الاستواء كلَيهما لها تأثير طفيف بعضها على بعض؛ فإن ما يُريد أن يوضِّحه أن في الحالات التي يتأثَّر فيها الطقس بالظروف الأولية، يمكن لأقل تغيير أن يؤثِّر في الطريقة التي تتحرَّك بها خطوط السير عبر فضاء الطور. ثمة نسخة أفضل من هذا التشبيه تكمن في افتراض أن أنظمة الطقس فوق المحيط الأطلسي الشمالي المداري مستقرة بثبات على شريط رملي في فضاء الطور؛ فحينئذٍ ستُحدث رفرفة أجنحة فراشة في السنغال تأثيرًا يجعلها تميل إلى جاذب (يتسبَّب في إعصار مداري) أو آخر (لا يتسبب في إعصار مداري). لكن هذا المثال لم يُقصد قط أن يُؤخذ على محمل الجد، وبالتأكيد لا يشير إلى أن التأثيرات الطفيفة مثل رفرفة أجنحة الفراشة «تفرض قوتها» على الأنظمة الكبيرة بصورة أو بأخرى. فهي ببساطة توفِّر القشة الأخيرة كما يقول المثل الدارج.

لكن ثمة نسخة مزعجة أكثر من كل هذا. فيشير بعض علماء المناخ إلى أن من بين العديد من الحالات المستقرة المحتملة (الجواذب) لمناخ الأرض بوجه عام، تتطابق إحدى هذه الحالات مع الظروف التي اعتدناها على مدى آلاف السنين الماضية، وتتطابق حالة أخرى مع العصر الجليدي الذي سبق تلك الحقبة، وحالة ثالثة تتطابق مع حالة من المناخ الحار تفوق متوسِّط درجة الحرارة في الوقت الحالي بنحو ٦ درجات مئوية. فتُشير نماذج المحاكاة القياسية الحاسوبية للاحترار العالمي الذي يحدث في الوقت الراهن نتيجة لتراكم غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى زيادة مطردة في درجة الحرارة بمعدل يزيد على ٣ درجات مئوية في ظل تزايد معدل تركيز ثاني أكسيد الكربون بنحو مرتَين عمَّا كان عليه قبل الثورة الصناعية. لكن جيم لافلوك — صاحب نظرية جايا — يشير إلى أن التحوُّل إلى الحالة الحارة ربما حدث قبل نهاية القرن العشرين. والتشبيه المستخدم هنا هو تشبيه الحالتَين بجاذبَين في فضاء الطور يفصل بينهما شريط رملي صغير، ومن خلال زيادة حرارة العالم، نُجبر خطوط السير على الدوران لأعلى وأعلى إلى حفرة ما إلى أن تعبر فجأة وتدخل إلى الحفرة الأخرى. إذا كان على حق في ذلك؛ فالوقت الذي أمامنا كي نتخذ إجراءً بشأن الاحترار العالمي أقصر ممَّا يعتقد الناس.

لكن لنُنحِ تلك التكهُّنات القاتمة، ما الذي يمكن أن تُخبرنا به نظرية الفوضى عن آلية عمل الكون؟ ما الذي حدث لنظرية نيوتن الخاصة بتنبُّؤية الكون من خلال تشبيهه بآلية الساعة؟

توجد بعض الأخبار السارة (لنا) والسيئة (لفكرة آلية الكون التي يشبه آلية عمل الساعة). أدَّت تفسيرات شهيرة لنظرية الفوضى إلى بعض التكهُّنات المزعجة المنطلقة من

فكرة أن هذه النظرية تعني أن كل شيء غير مستقر، وأنه بسبب حالة الفوضى التي تكتنف المجموعة الشمسية من الناحية العملية، قد تحيد الأرض فجأة عن مدارها الحالي إلى مدار آخر، أو تبتلعها الشمس نتيجة لاضطراب طفيف مثل مرور مذنَّب بالقرب منها. لكن للفوضى درجات. وذلك النوع من الفوضى يسري على الأجسام الصغيرة، مثل الكويكبات التي تقع تحت تأثير أجسام كبيرة مثل المشتري والشمس. لكن فوضوية مدار الأرض تنحصر في حدود معيَّنة. وأجهزة الكمبيوتر الحديثة قادرة على التحايل على معضلة الأجسام الثلاثة إلى حد كبير عن طريق استخدام الطريقة التكرارية المتدرِّجة خطوة بخطوة، وسبق استخدامها لحساب إلى أي مدًى يمكن أن يتغيَّر مدار الأرض خلال ملايين السنين القليلة التالية. بالطريقة المعتادة، تجري العملية الحسابية عدة مرات باستخدام ظروف أولية مختلفة قليلًا في كل مرة لمعرفة ما إذا كانت هذه الظروف تؤثِّر على النتيجة أم لا. توضِّح لنا النماذج أنه لا توجد سوى فرصة ضئيلة للغاية لحدوث أي تغيير مؤثِّر في مدارات الكواكب الثمانية الأساسية في المجموعة الشمسية على مدى مليارات السنين؛ تحديدًا حتى موت الشمس. لكن مدار الأرض حساس للظروف الأولية على نحو محدود. ففي أحد الأمثلة، لا يؤدِّي تغيير موضع الأرض في مدارها عند بداية العملية الحسابية بمقدار ٥ أمتار إلى تغيير هذا الموضع عند نهاية العملية الحسابية بمقدار ٥ أمتار مماثلة. وتزيد نسبة «الخطأ» إلى أن تصل المحاكاة إلى ١٠٠ مليون سنة، ويعجز النموذج حينها عن تحديد موضع الأرض في مدارها بالتحديد. كل ما يوضِّحه لنا النموذج أن الأرض في مكان ما في مدارها حول الشمس، وهو ما يمنحنا بعض الطمأنينة على الأقل. فالمدار بأكمله عبارة عن جاذب مثل قاع القبعة المكسيكية الذي يحوي أقل مقدار من الطاقة في نموذج جهد «القبعة المكسيكية».

على الرغم من ذلك، قد يُعتقَد أن المشكلة في كل ما ذُكر تكمن فقط في عدم قدرتنا على تحديد موقع الأرض في مدارها «بدقة»، أو تحديد درجة الحرارة والضغط والعناصر الأخرى في موضع بعينه في الغلاف الجوي «بالضبط». هل من المؤكَّد لو توصَّلنا إلى تلك المعلومات بعدد كافٍ من الأرقام العشرية، فستزول الشكوك ويصبح كل شيء قابلًا للتنبُّؤ مثلما ارتأى نيوتن؟ وهل فعلًا يعرف الكون بطريقة ما موضع كل شيء؛ ومِن ثَم فهو حتمي لا محالة؟ المفاجأة أن الإجابة القاطعة هي «لا».

تكمن المشكلة في عدم وجود خانات عشرية كافية. حتى اليونانيون كانوا يعرفون المشكلة وإن كان على نحو مختلف قليلًا. لا بد أن الأمر متعلِّق بطبيعة الأعداد. توجد ثلاثة أشكال للأعداد. الأعداد الصحيحة — مثل ١، ٢، ٣ وهكذا — وتلك الأعداد يسهل

فهمها والتعامل معها. النوع الثاني يمكن وصفه في إطار نِسب من عددَين صحيحَين مثل ١ / ٢، ٣ / ٤ وهكذا. وهذه يُطلق عليها الأعداد النسبية (من النسبة)، ويسهل استخدامها والتعامل معها نوعًا ما أيضًا. لكن اليونانيين كانوا على دراية تامة بوجود أعداد لا يمكن كتابتها في صورة نسب على هذا النحو، ويطلق عليها الأعداد غير النسبية. العدد الأهم لهم والمألوف لدينا هو الباي (π) أو ثابت الدائرة، وهو نسبة محيط الدائرة إلى قُطرها. يمكننا استخدام الأعداد النسبية مثل ٢٢ / ٧، كتقدير تقريبي، في حساباتنا، ولكن هذا ليس «سوى» تقدير تقريبي، كما نرى عندما نُحدِّث الحسابات عن طريق إدخال أعداد عشرية. وباستخدام طرق حسابية مختلفة وعمليات حسابية طويلة ومعقَّدة على الكمبيوتر، قُدرت قيمة π بملايين الأرقام العشرية، ويبدأ على النحو التالي: ٣,١٤١٥٩٢٦٥٣٥٨٩٧٩٣٢٣٨٤٦٢٦٤٣٣٨٣٢٧٩.

يبدأ العدد ٢٢ / ٧، الذي يُعَد قيمة تقريبية أولية نسبيًّا، من العدد العشري ٣,١٤٢٨٥٧؛ لذا فهو غير صحيح بالفعل في الخانة العشرية الثالثة. لكن النقطة المهمَّة بشأن الأعداد غير النسبية من حيث الكسور العشرية هي أن نمط الأعداد لا يتكرَّر مطلقًا. فالعدد ١ / ٣ — الذي يعبَّر عنه ككسر عشري، سيكون ٠,٣٣٣٣٣ ... بتكرار العدد ٣ إلى ما لا نهاية. لكن مع تكرار العدد يمكنك تحديد ذلك في صورة قاعدة بسيطة، وهذه القاعدة في ذلك المثال هي «الاستمرار في كتابة العدد ٣». يمكن التعبير عن كل الأعداد النسبية بمثل تلك القواعد أو باستخدام الخوارزميات. لكن لا توجد أي خوارزمية لتحديد قيمة π، أو أي عدد غير نسبي على وجه الدقة؛ بل ستحتاج إلى سلسلة لا نهائية من الأعداد، ستحتاج إلى جهاز كمبيوتر ذي ذاكرة غير محدودة. وهذا لعدد واحد فقط، على الرغم من أنه عدد حيوي في حساب مدار الأرض حول الشمس. الأسوأ من ذلك أنه قد تبيَّن أن معظم الأعداد غير نسبية. وساهم هذا في تعقيد مشكلة مستعصية بالفعل في تحديد حتى موضع نقطة واحدة على خط ما تحديدًا دقيقًا. لنفترض أن موضع تلك النقطة هو ١ / π على الخط بين النقطتين «أ» و«ب». لا يمكن التعبير عن هذه النقطة بدقة من المنظور الرياضي. يمكن التعبير عنه بأي عدد من الخانات العشرية، لكن إذا كان نوع الفوضى الذي اكتشفه لورينز له تأثير، فإن العدد العشري التالي، الذي تتجاهله، قد يغيِّر القيمة التي تُحاول أن تحسبها على نحو هائل.

قد يتطلَّب الأمر جهاز كمبيوتر ذي ذاكرة غير محدودة لتحديد حالة جُسيم «واحد» في الكون. وهذا يعني أن النظام الوحيد القادر على محاكاة الكون بدقة هو الكون نفسه.

وعلى غير المتوقَّع، فحتى لو كان كل شيء محدَّدًا بدقة ويسير كساعة كونية، لا توجد طريقة للتنبُّؤ بالمستقبل بدقة، والكون نفسه لا يعلم شيئًا عن المستقبل مثلنا، بل له إرادة حرة في الواقع. فالأشياء الصغيرة حقًّا تعني الكثير.

هوامش

(١) تُعَد القفزة النوعية بالفعل أصغر تغيير ممكن، وتحدث على نحو عشوائي للغاية. والمعنى يختلف تمامًا عمَّا يعتقده المعلِنون حين يقولون إن منتجًا ما يمثِّل «قفزة نوعية» عن نسخة العام الماضي من المنتج نفسه.

(٢) تُستخدم كلمة «نظام» للإشارة إلى أي مجموعة من الأجسام المتفاعلة، مثل المجموعة الشمسية.

الاحتمال المستبعد السابع: جميع الكائنات المعقَّدة الحالية على الأرض تنحدر من خلية واحدة

توجد ثلاثة أنواع من الكائنات على الأرض، كل نوع مختلف عن النوعَين الآخرَين من حيث المستوى الأساسي للخلية. النوع الذي نراه جميعًا من حولنا — أي الأشجار والبشر وعش الغراب وثعابين البحر — يتألَّف بالكامل من خلايا معقَّدة لها مركز داخلي، هو النواة، يحتوي على الحمض النووي الذي يحمل المعلومات الأساسية للكائن، وذلك الحمض محوط بكيس من مادة هلامية يحدث بداخلها تفاعل كيميائي مثير، وكل ذلك متماسك معًا داخل جدار خلوي. تلك الخلايا تسمَّى الخلايا الحقيقية النواة. وكل تلك الكائنات المعقَّدة تنحدر من خلية واحدة تشكَّلت عن طريق اندماج خليتَين أبسط منذ بضعة مليارات من السنين.

لقد ذكرتُ هذا من قبل، وذكرتُه في عنوان هذا الفصل. ولكنه اقتراح مستبعد، وحَرِي بي أن أتحدَّث عنه للمرة الثالثة، مصداقًا لقول حامل الجرس في قصيدة لويس كارول «صيد السنارك»: ما أخبرك به ثلاث مرات صحيح. «كل الكائنات المعقَّدة على الأرض اليوم وفيها أنت وأنا وثمرة الموز تنحدر من خلية واحدة»، وليس المعنى أن كلًّا منا ينحدر من خلية واحدة تشكَّلت وقت الحمل، بل من خلية واحدة تشكَّلت بفعل حَمْل كوني حدث منذ ما يقرب من مليارَي سنة. وبذلك تكون كل النباتات وكل الفطريات وكل الحيوانات وكل الطحالب، كلها تنحدر من خلية واحدة. وكما يُحب أن يُشير علماء الأحياء التطوُّرية، لا يوجد فرق واضح بين خلية فطر وخلية إنسان. فالخليتان كلتاهما تعمل بالطريقة نفسها، حيث تنقل المعلومات المشفَّرة في الحمض النووي من أجل تكوين البروتينات وما إلى ذلك، على الرغم من أن الكائنات التي تتكوَّن منها لها أنماط حياة مختلفة تمام الاختلاف (ما لم يكن لدى الإنسان عادات غريبة للغاية).

هذا الاكتشاف مذهل لدرجة أنه يجعل الاكتشافات ذات الصلة المذهلة في حد ذاتها أيضًا تبدو شبه عادية. ولكنها ليست كذلك. المفاجأة الأولى هي وجود نوعَين من الخلايا بالفعل يُطلق عليهما مجتمعَين بدائيات النوى، وكلاهما يفتقر إلى النواة المركزية التي تمثِّل السمة المميَّزة لحقيقيات النوى. لكن الفرق بين هذَين النوعَين من الكائنات الوحيدة الخلايا (لأن هذه هي ماهيتهما) لم يتَّضح حتى سبعينيات القرن العشرين. وقبل ذلك الوقت، صُنفت كل بدائيات النوى ضمن فئة البكتيريا، على الرغم من اكتشاف وجود بعض أنواع غير مألوفة من البكتيريا. ومع تطوُّر تقنيات دراسة المادة الجينية للخلايا، جُمِّع العديد من هذه «البكتيريا» غير المألوفة في مخطط تصنيفي واحد، وأُطلق عليها اسم البكتيريا القديمة؛ نظرًا لوجود اعتقاد بأنها أقدم من البكتيريا، وتُعَد من ناحية ما من أسلاف البكتيريا الحالية؛ لكن عندما تبيَّن أن أصول البكتيريا تعود إلى ذلك الوقت، أُسقط القسم الثاني من الاسم، وتعرف الآن ببساطة باسم العتائق. لم يُسهم هذا في توضيح الأمور بالكامل؛ لأن تحليلات الحمض النووي والحمض النووي الريبوزي تُبيِّن أن العتائق والبكتيريا متساويتان من حيث العمر. ومن هنا تبرز مفاجأة أخرى.

يأتي أقدم دليل على وجود حياة على الأرض من صخور عمرها ٣٫٨ مليار سنة تقع في جنوب غرب جرينلاند. تُعَد هذه الأدلة بمثابة «توقيعات» كيميائية لأشكال الحياة وليست أحفوريات، ولكن قبل ٣٫٢ مليار سنة، كانت أشكال الحياة فيما يُعرف الآن بأستراليا تترك آثارًا أحفورية أصلية. وتقريبيًّا، بدأت الحياة على الأرض منذ نحو أربعة مليارات سنة؛ أي بعد نشأة الكوكب بنصف مليار سنة فقط. وقد دبَّت الحياة على الأرض «مرتَين».

تَكشَّف الكثير بعد إجراء دراسات تفصيلية لآليات العمل الداخلية للعتائق والبكتيريا. فعلى النطاق الأشمل (أي فيما يتعلَّق بالخلية)، تشترك العتائق والبكتيريا في أقل من ثلث جيناتها. وعلى مستوًى أكثر تفصيلًا، نجد أن بِنية جدار الخلية فيهما مختلفة، والدليل الأهم من بين كل الأدلة هو اختلاف الطريقة التي ينسخ بها النوعان الحمض النووي عند انقسام الخلية من أجل تكوين خلايا جديدة. يستخدم النوعان الشفرة الجينية نفسها، ولكنهما ينسخانها بطرق مختلفة. وهذه اختلافات عميقة للغاية، والقول إن كِلا النوعَين يمكن أن يكون قد انحدر من سلف مشترك «يخالف المنطق» على حد تعبير عالِم الكيمياء الحيوية نيك لين. لا بد أن كل نوع قد نشأ بمعزل عن الآخر، ولكنهما ينحدران من نوع «الحساء» الكيميائي نفسه، وهو ما يفسِّر أوجه التشابه بينهما. كان الافتراض الذي طرحه لين وآخرون في ذلك الشأن هو أن هذا ربما يكون قد حدث بالقرب من الفتحات الساخنة في

قاع البحر حينما كانت الأرض حديثة النشأة، فيما حفَّزت الطاقة المنبعثة من هذه الفتحات العمليات الكيميائية التي كوَّنت مواد معقدة مثل البروتين والحمض النووي الريبوزي قبل أن تتكوَّن الخلايا؛ وهي عبارة عن دفق من الطاقة يتيح للإنتروبيا «السير في اتجاه عكسي» كما ذكرنا سابقًا. ثمة افتراضات أخرى — ناقشتُ أحدها في كتابي «سبعة أعمدة للعلم» — ويبدو أننا لن نعرف أبدًا ما حدث عندما بدأت الحياة على كوكب الأرض. ولن نعرف أيضًا أبدًا ما إذا كانت الحياة قد دبَّت على الأرض مرتَين أم لا؛ فربما كان هناك بدائيات نوًى أخرى لم ينحدر منها نسل في الوقت الحاضر. لكن ما نعرفه هو أنه منذ ما يقرب من ٤ مليارات سنة، وحتى وقتنا الحاضر، كان هناك نوعان مختلفان من الكائنات أحادية الخلية على الأرض. وهذا يجعل النوعَين كائنات ناجحة إلى حد بعيد في البقاء، ولكن لأننا لا نعرف مفهوم العتائق مثلما نعرف البكتيريا، فالأمر يستحق أن نوضِّح كيف نجحت العتائق في البقاء.

يتراوح قُطر خلايا البكتيريا النمطية بين ٠٫٢ و٢٫٠ ميكرومتر، وإن كان بعضها طويلًا ورفيعًا، والعتائق لها الحجم نفسه إلى حد كبير. أول العتائق التي حُدِّدت تعيش في بيئات قاسية مثل الينابيع الحارة والبحيرات المالحة، حيث لا يمكن لأي كائنات أخرى أن تحيا. ولكن المعروف في الوقت الحاضر أنها تعيش في كل مكان تقريبًا، ويشيع وجودها بالذات في المحيطات، حيث تُشكِّل نحو خُمس إجمالي الخلايا الميكروبية. وتُعَد العتائق المنتمية لفصيلة العوالق من أكثر الكائنات وفرة على الأرض. وقد أدَّى تنوُّع العتائق إلى منحها أهمية حيوية في العديد من الأدوار في البيئة؛ منها تثبيت الكربون ودورة النيتروجين. كذلك تمثِّل العتائق جزءًا من «البيئة الداخلية» لحقيقيات النوى — «الميكروبيوم» أو مجهريات البقعة — كما أنها تعيش في جسم الإنسان في الأمعاء والفم وعلى البشرة وجميع المواضع، حيث تدخل في العديد من العمليات التي تساعد في استمرار وظائف الجسم. ولكن على عكس البكتيريا، لا توجد عتائق معروفة تسبب الأمراض. بل يبدو، في الحقيقة، أن العتائق تمتاز بمهارة شديدة في التعايش مع أشكال الحياة الأخرى. ويطلق على العديد منها كائنات تكافلية؛ إذ تنشئ علاقات قائمة على المنفعة المتبادلة مع الكائنات الأخرى من دون أن يتضرَّر أي منها من الآخر، بينما تُعرف أخرى بأنها متعايشة؛ إذ إنها تستفيد من علاقة ما، بصورة مباشرة أو غير مباشرة، ولكن دون مساعدة رفاقها أو الإضرار بها. والمثال الكلاسيكي للنوع التكافلي عتائق تسمَّى العتائق الميثانوجينية، التي تشكِّل نحو ١٠ بالمائة من إجمالي بدائيات النوى التي تعيش في أمعاء الإنسان، وتتفاعل

مع الميكروبات الأخرى للمساعدة على الهضم. يوجد هذا النوع من العتائق أيضًا في أنواع أخرى، ويُسفر نشاطها عن إنتاج الميثان مثلما يتبيَّن من اسمها. ولكن ما هو أهم من ذلك أن نزوع العتائق إلى التكافل والتعايش يشير إلى شيء آخر، ألَا وهو سبب وجودنا هنا. لأكثر من نصف فترة وجود الحياة على الأرض، لم يكن هناك كائنات حقيقية النوى لتتنافس على لقب أنجح أشكال الحياة على الأرض. لكن بعد ذلك حدث شيء ما.

لا ينبغي الظن بأن الحياة كانت تسير في سلام وهدوء إلى أن جاءت السلالة البشرية إلى الوجود. فحتى على مستوى الخلايا الفردية، كانت الكائنات تتنافس بعضها مع بعض من أجل الموارد، وكانت الطفرات الجينية تُفرز أنواعًا جديدة ربما تأثَّرت بالانتقاء الطبيعي. وتطوَّرت الحياة. وفي خضم التنافس على الموارد، كان من إحدى الطرق التي كانت الخلية تستخدمها كي تضع أيديها، مجازًا، على المؤن الجديدة هي التهام خلية أخرى — أو ربما اندماج خليتَين معًا لتجميع وتوحيد مواردهما. وقد صار واضحًا الآن أن تلك الأحداث وقعت مرة على الأقل منذ ما يقرب من مليارَي سنة، عندما التهمت العتائق نوعًا معيَّنًا من البكتيريا، ما جعلها تحتفظ بنوع من الاستقلالية داخل الخلية المندمجة، ومِن ثَم أصبحت سلفًا لجميع حقيقيات النوى. أمَّا فيما يتعلَّق بأصل الخلايا، فربما وقعت أحداث مثل هذه أكثر من مرة، ولكن التشابه في المادة الجينية لجميع الكائنات المعقَّدة على الأرض اليوم يوضِّح أن اندماجًا واحدًا فقط من هذا النوع أفرز تلك السلالة التي استطاعت البقاء.

تكشَّفت خيوط الأحداث التي وقعت وكيفية وقوعها بترتيب عكسي؛ إذ بدأت بدراسة خلايا الكائنات الحية في الوقت الحاضر ومعرفة ماهيتها في الماضي. بدأت تلك الدراسات على يد عالِمة الأحياء الأمريكية لين مارجوليس في أواخر ستينيات القرن العشرين. كان اهتمامها منصبًّا على الميتوكوندريا بوجه خاص، وهي عبارة عن بِنًى (عُضَيَّات) على شكل حبات الأرز، ويبدو أنها تتمتَّع بوجود شِبه مستقل داخل الخلايا الحقيقية النوى، وتعالج الطاقة التي تستخدمها الخلايا. تحمل هذه الكائنات الوقود (أو الطعام) الوارد إلى الخلية بصورة يومية، وتُتيح له الاندماج مع الأكسجين (الحرق) لإطلاق الطاقة (التنفُّس). اكتُشفت هذه المكوِّنات للخلية في نهاية القرن التاسع عشر، وطرحت فرضيات تفيد بأنها بكتيريا حقيقية تعيش في علاقة تكافلية داخل الخلايا. يوجد وضع مشابه في الخلايا النباتية، حيث تجمع العُضَيَّات — المعروفة باسم البلاستيدات الخضراء — الطاقة من أشعة الشمس وتحوِّلها إلى طاقة كيميائية تُستخدم لدمج المياه مع ثاني أكسيد الكربون لتكوين المادة العضوية (عملية البناء الضوئي). وبات واضحًا أن البلاستيدات الخضراء تتشارك العديد من الخصائص مع

بكتيريا الزراقم أو البكتيريا الزرقاء، وهي كائنات دقيقة تعيش في المياه، ويبدو أنها نشأت منها. مع تطوُّر التقنيات المتاحة لدراسة الحمض النووي، دُعمت هذه الأفكار باكتشاف أن الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء لها حمض نووي خاص بها يختلف عن نظيره في الخلايا التي تسكنها. ومنح هذا علماء الأحياء التطورية أداة إضافية للبحث في العلاقات بين الأنواع في الماضي والحاضر. وتبيَّن أن الحمض النووي للبلاستيدات الخضراء لا يختلف عن الحمض النووي لبكتيريا الزراقم بالفعل، في حين أن الحمض النووي للميتوكوندريا يشبه الحمض النووي لمجموعة من البكتيريا تضم (وإن كان ذلك قد يبدو مستبعدًا) تلك التي تسبِّب الإصابة بالتيفوئيد. لكن هذه العناصر من الخلية لا تمتلك سوى بعض من الحمض النووي لأسلافها، وهذا لا يكفي ليتيح لها أن تحظى بوجود مستقل خارج بيئة الخلية؛ إذ إن ذلك محكوم إلى حد كبير بالمادة الوراثية في نواة الخلية.

أصبحت مارجوليس أولى أنصار فكرة أن التعايش كان بمثابة قوة أساسية في تطوُّر الخلايا، وهي الحجة التي لخَّصَتها في كتابها «أصل الخلايا الحقيقية النوى». وقادها حماسها إلى القول بأن الأصل البكتيري للعديد من البِنى يُرى داخل الخلايا الحقيقية النوى، وما زال جمهور العلماء يفنِّدون بعض تلك المزاعم. لكن لا يوجد شك البتة بشأن أصل البلاستيدات الخضراء (وهو الأهم لنا) والميتوكوندريا. إنها تنحدر من أسلاف كانوا يعيشون أحرارًا واندمجوا، بطريقة ما، داخل خلايا أخرى. وقد أوجز ريتشارد دوكينز أهمية دراسة مارجوليس؛ إذ قال:[١]

> إن النظرية القائلة إن الخلية الحقيقية النواة عبارة عن اتحاد تكافلي من الخلايا البدائية النوى ... لهي واحد من أعظم إنجازات علم الأحياء التطوُّرية في القرن العشرين، وأنا أُكن لها إعجابًا كبيرًا.

عندما بدأت مارجوليس دراستها، كان من الطبيعي أن تفترض وجود اندماجات بين أنواع مختلفة من البكتيريا؛ لأن أهمية العتائق لم تكن قد اكتُشفت بعد. ولكن الآن بات واضحًا أن الشريك المهيمن في الاندماج الأولي كان نوعًا من بكتيريا العتائق. فالخلايا الحقيقية النوى تنبثق من اندماج بين مسارَين منفصلَين تمامًا لتطوُّر الخلايا.

يعتبر نيك لين، بكلية لندن الجامعية، المؤيِّدَ الرئيس لفكرة مارجوليس عن هذا التطوُّر. ويكمن أساس مساهمته في هذا النقاش في زعمه بأن «الأصل الفريد للكائنات المعقَّدة ربما «اعتمد» على اكتساب الميتوكوندريا. فقد كانت، بطريقة ما، هي الحافز له.»[٢]



لين مارجوليس (جيتي إيمدجز).

يعتمد هذا الزعم جزئيًّا على حقيقة أنه على الرغم من وجود بضعة استثناءات لقاعدة أن الخلايا الحقيقية النوى الموجودة اليوم تمتلك الميتوكوندريا؛ فإن الأدلة الوراثية توضِّح أن كل خلية من الخلايا الحقيقية النوى تنحدر من أسلاف مشتركة مع الميتوكوندريا. لكن لمعرفة السبب وراء هذا الادعاء، نحتاج إلى دراسة ما تفعله الميتوكوندريا بالضبط وكيف تساهم في أنشطة الخلية.

تعتمد الخلايا أساسًا على الكهرباء، ولكن على عكس الجسيمات التي تحمل الكهرباء في أسلاك المنزل التي تُعَد إلكترونات سالبة الشحنة، فإن الجسيمات التي تحافظ على عمل الخلية عبارة عن بروتونات موجبة الشحنة. تنتقل هذه البروتونات من مكان إلى آخر

عن طريق عمليات كيميائية، ومثلما يشبَّه تدفُّق الكهرباء في الأسلاك في بعض الأحيان بتدفُّق المياه في الأنابيب، يُشبَّه نقل البروتونات من مكان إلى آخر في بعض الأحيان بحركة مضخة تقوم بدفعها عبر الأسلاك. تتكوَّن الميتوكوندريا من غشاء مزدوج (وهو نمو تطوُّري منبثق من جدران خلاياها الأصلية)، والغشاء الداخلي مجعد إلى عدة طيات أو ثنيات، ما يعني أنها تتمتع بمساحة سطح كبيرة مضغوطة في مساحة صغيرة. وهذا السطح هو الموقع الأساسي الذي يمكن أن تحدث عليه العملية الكيميائية التي تتضمَّن نقل البروتونات وإطلاق الطاقة. تتضمَّن التفاعلات الكيميائية جزيئًا حاملًا للطاقة يُطلَق عليه أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، ولكني لا أنوي الخوض في تفاصيل التفاعلات الكيميائية هنا. ما يهمنا معرفته هنا أن مجموعة من التفاعلات تخزِّن الطاقة (المكتسبة من الطعام) عن طريق ضخِّ البروتونات عبر الغشاء في اتجاه واحد، ثم عندما تحتاج الخلية إلى الطاقة، تقوم بإنتاجها عن طريق السماح بتدفُّق البروتونات في الاتجاه المعاكس، مثل المياه التي تتدفَّق بجانب عجلة الطاحونة وتجعلها تدور. والجمع بين هذه الخصائص يعني أن الميتوكوندريا يمكن أن توفِّر قدرًا كبيرًا من الطاقة في أي مكان في الخلية وفي أي وقت تحتاج إليها. كما يمكنها (وهو ما يُعَد في رأيي مهمًّا بالقدر نفسه)، فعل ذلك على نحو مُطَّرد. من الناحية الكيميائية، تتحكَّم الخلايا البدائية النوى في مورد الطاقة الخاصة بها بالطريقة نفسها إلى حد بعيد، لكن الإجراء برمته يحدث بالقرب من جدرانها الخلوية، وتلك الجدران ليس لها بنية معقَّدة مثل أغشية الميتوكوندريا، ولا يمكن أن تأخذ الطاقة إلى حيث تحتاج إليها. وحتى تتمكَّن بدائيات النوى من استخدام الطاقة، تُضطر إلى تكوين مادتها الوراثية بالقرب من مورد الطاقة، حول حواف الخلية. ونظرًا لأن الجينات مطلوبة للتحكُّم في عمليات التشغيل في كل مكان داخل الخلية، فقد تنطوي تلك العملية على إنتاج نسخ من الجينات في العديد من الأماكن حول الحافة وهو ما يُهدر الموارد.

تستخدم خلايا الكائنات المعقدة قدرًا كبيرًا من الطاقة. والعملية الأساسية التي تحافظ على عمل الخلايا — بمعنى إبقائها حية — هي تحويل المعلومات في الشفرة الوراثية المختزنة في الحمض النووي إلى بروتينات تقوم بعمل الخلية وتوفِّر بنية للجسم. وتلك العملية تستهلك ثلاثة أرباع «ميزانية» الطاقة للخلية النمطية، سواء كانت من بدائيات النوى أو حقيقيات النوى. وكلما زاد عدد الجينات، زاد تعقيد الكائن. لكن عدد الجينات مقيَّد بتوافر الطاقة. وتذكَّر أنه في كل مرة تنقسم فيها خلية وتتضاعف، ينبغي

نسخ الجينوم بأكمله لتوفير مجموعة من المعلومات لكل خلية متولِّدة، وتلك العملية أيضًا تتطلَّب طاقة. يوجد حوالي ٥٠٠٠ جين مختلف في الكائن البكتيري النمطي. لكن في «أصغر» كائن من حقيقيات النوى، يوجد حوالي ٢٠٠٠٠ جين. وتحتوي الخلية الحقيقية النواة المتوسِّطة على عدد جينات يفوق الخلية البدائية النواة بمقدار ٢٠٠٠٠٠ جين. ويعود الاختلاف بالكامل إلى توافر الطاقة، وذلك بفضل وجود الميتوكوندريا. وتأسيسًا على الافتراض التقريبي الجاهز بأن كل جين يحتاج إلى الكم نفسه من الطاقة، فإن محتوى الخلية الحقيقية النواة من الطاقة يفوق محتوى الخلية البدائية النواة بمقدار ٢٠٠٠٠٠ ضعف، ويتم توصيل تلك الطاقة أينما ووقتما تحتاج إليها الخلية.

ويعمل هذا على تحقيق عدة فوائد. أولًا: يُتيح للخلية عمل نسخ إضافية من الجين، وهو أمر لا مفر من حدوثه مع توافر المزيد والمزيد من الطاقة؛ يمكننا أن نتخيَّل آليات النسخ لدى حقيقيات النوى الأولى وهي تقوم بعملها، كأنها المكانس السحرية التي تحمل دِلاء الماء في فيلم «فانتازيا» الذي أنتجته شركة ديزني؛ نظرًا لعدم وجود طريقة لإخبارها بأن تتوقَّف. ولا تسير عملية النسخ على نحو مثالي وتام على طول الخط؛ لذا سيكون ثمة أخطاء في النسخ من وقت لآخر — الطفرات الجينية — ما يوفِّر المادة الخام لإصدارات جديدة من تلك الجينات، وفي النهاية تتكوَّن جينات جديدة بفعل الانتقاء الطبيعي. كل جين إضافي يحتاج إلى الطاقة، ولكن لا مشكلة في توصيل تلك الطاقة بفضل الميتوكوندريا. كذلك يؤدِّي توافر المزيد من الطاقة إلى تسريع التطوُّر. ثانيًا: عندما لا يعود الجينوم بحاجة إلى الذهاب إلى مصدر الطاقة، يمكن تخزين الجينات في قلب الخلية — في النواة — حفاظًا عليها من الأذى ولترك مساحة لآلية الخلية حتى تباشر عملها. لا بد أن هذا التطوُّر نفسه كان نتاجًا للتطوُّر الذي يحفِّزه توافر الطاقة، ولكن من غير المُحتمل أننا سنعرف الطريقة التي حدث بها هذا التطوُّر بالضبط. في غضون ذلك، فقدَت أسلاف الميتوكوندريا الجينات التي مكَّنتها من البقاء على قيد الحياة خارج البيئة الخاصة بالخلية المضيفة لها، ولكنها احتفظت بالخلايا التي اشتركت في معالجة الطاقة. وتطوَّرت تلك الخلايا أيضًا حتى تُزيد كفاءتها في توفير تلك الطاقة. والمنتج النهائي هو الخلية الحقيقية النواة كما نعرفها اليوم. لكن ماذا كان «المنتج» الأولي؟ وكيف يمكن أن نتأكَّد أنه لم تكن هناك بالفعل سوى خلية واحدة هي التي أصبحت سلفًا لجميع الكائنات الحقيقية النوى على الأرض في الوقت الحاضر؟

ذهب لين (وهو ما لم يقبله الجميع، ولكنه يبدو مستساغًا لي) إلى أنه منذ ما يقرب من مليارَي سنة (قبل أن تنتقل أشكال الحياة إلى اليابسة)، كانت هناك مجموعة من العتائق

تعيش في المحيط، ومجموعة من البكتيريا تعيش بجانبها. بقيت المجموعتان على مقربة شديدة؛ نظرًا لوجود مصالح متبادلة بينهما، أو على الأقل مصالح لطرف واحد من طرفَي العلاقة. وافترض أن إحدى المجموعتَين ربما كانت تتغذَّى على فضلات المجموعة الأخرى، ولكنه لم يقدِّم ذلك إلا كتخمين. ولو أن شيئًا من هذا القبيل قد حدث، كان المستفيد — ولنقل البكتيريا — لينمو ويزدهر على نحو أفضل كلما اقترب من مصدر الطعام؛ أي العتائق. وفي مرحلة ما — على الأقل مرة واحدة — اقتربت واحدة من البكتيريا بشدة من أحد العتائق حتى إنه احتضنها بداخله، دون أن تُلتَهم (على عكس المُحتمل). فقد صُفِح عن المعتدي؛ لأنه لم يتسبَّب في أي أذًى، ومِن ثَم ازدهرت تلك البكتيريا نظرًا لتوافر أي فضلات تحتاج إليها حولها. ونظرًا لزيادة اعتمادها على ذلك المصدر، فقدت الجينات التي لم تَعُد بحاجة إليها، وصارت ببساطة مركز قوة.

هذا ما يسمَّى في بعض الأحيان بقصة حدثت «هكذا فحسب» نسبة إلى كتاب من تأليف روديارد كيبلنج. ربما جرت الأحداث على ذلك النحو، ولكن القصة في حقيقتها حكاية رمزية تحثُّنا على التفكير في الاحتمالات. ما يُهم أن فردًا من العتائق وفردًا من البكتيريا اندمجا معًا، وبغض النظر عن عدد المرات التي حدث فيها ذلك، فإن واحدًا فقط من تلك الاندماجات خلَّف سلالة ما زالت باقية إلى يومنا هذا. وقد تطوَّرت جميع السمات المميزة لحقيقيات النوى بعد حدوث هذا الاندماج. وهذه السمات مشتركة بين جميع حقيقيات النوى، حتى بين ما يسمِّيه لين «حقيقيات النوى الدقيقة» وهي «خلايا بالغة الصغر لكنها مكتملة التكوين ... وهي صغيرة في حجم البكتيريا ولكن لا تزال تتميَّز بنواة مصغَّرة وميتوكوندريا قزمية.» في جميع الخلايا الحقيقية النوى، تحاط النواة بنوع خاص من الغشاء المزدوج، وجميعها تحتوي على كروموسومات مستقيمة (خطية) (بالنظر إلى أن بدائيات النوى تجعل جيناتها تنسج حلقات مستديرة من الحمض النووي)، وتستخدم العمليات الكيميائية نفسها لتشغيل آلية الخلية، وتتكاثر جميعها جنسيًّا، وهو ما يلعب دورًا كبيرًا في عملية التطوُّر.[٣] لا داعي للإسهاب في تفاصيل تلك النقطة؛ لأنه بفضل تقنيات التسلسل الحديثة، يمكن تحليل حمضها النووي ومعرفة مدى قوة العلاقة التي تربطها مباشرة. الدليل قاطع. ولكن قبل أن أنتقل إلى نقطة أخرى، أود الإشارة إلى سمة تميِّز دور الميتوكوندريا كثيرًا ما تُغفَل.

لا توفِّر الميتوكوندريا الطاقة للخلية فحسب. بل توفِّرها بطريقة محكمة. الأمر الذي يعيدني إلى المناقشة الخاصة بالفوضى والتعقيد. تقف أشكال الحياة على مشارف نقطة

التوازن وليس عندها تمامًا، ما يغذِّي تدفُّقًا للطاقة. في الخلية الحقيقية النواة، تتحكَّم الميتوكوندريا في ذلك التدفُّق. إذا كان التدفُّق بطيئًا للغاية (كتدفُّق المياه بسلاسة وراء صخرة في نهر)، نقترب أكثر من نقطة التوازن ولا يحدث شيء مثير للاهتمام، حيث تتوقَّف الكيمياء الحيوية وتموت الخلايا. أمَّا إذا كان التدفُّق سريعًا (مثل إعصار يعصف بصخرة)، فإننا نجني فوضى وتتعطَّل المسيرة السلسة للعمليات الكيميائية الحيوية في الخلية. ما يعني موتها. نحن وجميع الكائنات الحقيقة النوى نعتمد اعتمادًا كليًّا على الميتوكوندريا في الحفاظ على التوازن المتذبذب بين هذَين الشكلَين للموت.

ما الذي يخبرنا به كل هذا عن احتمالات وجود حياة في مكان آخر من الكون؟ الخبر السار أنه لو كان قد تواجد نوعان مختلفان من الكائنات الخلوية على الأرض بمجرَّد أن بردت حرارة الكوكب، فإن فُرص وجود حياة على كواكب أخرى عالية بلا شك. والخبر السيئ أنه لو كان الأمر قد استغرق مليارَي سنة قبل أن يحدث لقاء قدَري بين خليتَين بدائيتَي النواة، وأدَّى هذا اللقاء إلى نشأة كائنات حقيقية النوى، فلا بد أن فرص وجود مثل تلك الحياة المعقَّدة على الكواكب الأخرى ضئيلة للغاية. وربما تكون أقل ممَّا يبدو للوهلة الأولى. لقد تمَّ هذا اللقاء القدَري بين شكلَين مختلفَين من الكائنات البدائية النوى، حيث جلب كل منهما حِزم الجينات المميزة له وأدخلها في عملية الدمج. وقد أسهم ذلك على الفور في إعطاء أُولى حقيقيات النواة جينومًا أكثر تعقيدًا والمادة الخام اللازمة للعمليات التطوُّرية كي تعمل عليها. إذا كنت تريد أن يندمج نوعان مختلفان من الخلايا البسيطة من أجل إنتاج ذلك النوع من الكائنات المعقدة التي أدَّت في النهاية إلى وجودنا، فستصبح فرص وجود كائنات معقَّدة مثلنا على الكواكب الأخرى ضئيلة لدرجة أنها تكاد لا تُرى. وحتى على مستوى الكون، فإن وجودنا مستبعد إلى حد بعيد. وحتى التعقيد لا يشير بالضرورة إلى تطوُّر نوع الكائنات الذكية الذي ننتمي إليه. فبعد مليارَي سنة من تطوُّر الحقيقيات النوى، تطلَّب الأمر مجموعة من الظروف المستبعدة لتحويل قرد أفريقي إلى «هومو سابين» (الإنسان البدائي العاقل).

هوامش

(١) انظر كتاب «الحضارة الثالثة: ما بعد الثورة الصناعية»، تأليف جون بروكمان، دار نشر سايمون وشوستر، ١٩٩٥.

(٢) انظر كتاب «السؤال الحيوي»، دار نشر بروفايل، لندن، ٢٠١٥. الأفكار التي يوردها لين وضعها من دراسة عكف عليها مع زميله بيل مارتن.

(٣) انظر كتاب جون جريبين وجيرمي تشيرفاس «لعبة التزاوج»، دار نشر بينجوين، لندن، ٢٠٠١.

الاحتمال المستبعد الثامن: إيقاعات العصر الجليدي وتطوُّر الإنسان: شعب الجليد

طالما كان تطوُّر الكائنات على الأرض متأثِّرًا بالتغيُّرات البيئية والمناخية. وكان من أكبر تلك التغيُّرات ذلك الحدث — أو سلسلة الأحداث — الذي وقع منذ ما يقرب من ٦٥ مليون سنة وأدَّى إلى نهاية عصر الديناصورات. وهذا الحدث تضمَّن، على نحو شبه مؤكَّد، اصطدام نيزك كبير نوعًا ما بكوكب الأرض، على الرغم من إمكانية مشاركة عوامل أخرى. لمَّا كان موت الديناصورات قد أدَّى إلى نشأة الثدييات، فتلك نقطة جيدة للبدء في سرد قصة أصل الإنسان ونشأته. لكن لنضع في الاعتبار أن ٦٥ مليون تعادِل أكثر من ٣ بالمائة من مليارين بقليل. وبذلك ظلَّت الكائنات الحقيقية النوى في طور التطوُّر لمدة ٩٧ بالمائة من الزمن منذ نشأتها إلى نشأة الإنسان قبل اصطدام النيزك بالأرض.

توضِّح مجموعة من الأدلة الجيولوجية أنه في غضون الستين مليون سنة أو نحو ذلك التي أعقبت موت الديناصورات، وقت أن كانت الثدييات في طور التنوُّع وشغل العديد من المواقع البيئية التي خلَّفتها أسلافها، انخفضت درجة حرارة الأرض ببطء وعلى نحو غير متساوٍ بفعل الطريقة التي كانت تتحرَّك بها القارات على سطح الكرة الأرضية، ما أدَّى إلى تغيُّر طريقة امتصاص أشعة الشمس وانعكاسها، وغير جريان التيارات المحيطية. لكن منذ ما يقرب من ٤ ملايين سنة، وُصِل إلى نقطة ذروة.

تشير الأدلة إلى أنه منذ ٦٥ مليون سنة، لم تكن هناك صفائح جليدية كبيرة على الأرض، على الرغم من احتمالية هطول ثلوج موسمية على قمم الجبال. بدأ هذا الوضع يتغيَّر منذ نحو ١٣ مليون سنة، عندما انجرفت قارة أنتاركتيكا ببطء نحو القطب الجنوبي،

وبدأت الصفائح الجليدية تتشكل فيما يُعرَف الآن باسم شرق قارة أنتاركتيكا. قبل ١٠ ملايين سنة، كانت هناك أنهار جليدية صغيرة على جبال ألاسكا. ومنذ ما يقرب من ٦ ملايين سنة، ابتعدت أستراليا وأمريكا الجنوبية عن قارة أنتاركتيكا، تاركتين ممرًّا خاليًا لتيار محيطي قوي — التيار القطبي للقطب الجنوبي — أحاط بقارة أنتاركتيكا، ما جعل المياه الدافئة بعيدًا في القاع، واحتجز القارة في عصر جليدي كامل. اختلفت الأمور في نصف الكرة الشمالي، حيث تدفَّقت التيارات الدافئة أولًا إلى القطب؛ ما جعل محيط القطب الشمالي خاليًا من الجليد. لكن ظلَّت القارات المنجرفة هناك تنزلق ببطء إلى المواقع التي نعرفها اليوم، لتحيط تدريجيًّا بالمحيط القطبي، وتقلِّل تدفُّق التيارات الدافئة عن الوصول إلى المحيط القطبي على نحو هائل. في الجنوب، كانت توجد قارة يغطِّيها الجليد دومًا، أمَّا في الشمال، فتكوَّن محيط مغطًّى بالجليد، وانتشر الجليد على نطاق واسع على اليابسة المحيطة بذلك المحيط منذ ما يقرب من ٣٫٦ مليون سنة. غرق العالم في حقبة جليدية تكوَّنت خلاله الصفائح الجليدية ثم تقلَّصت، ولكنها لم تختفِ بالكامل. إن الموقف الذي نعتقد أنه طبيعي — أي تغطية الجليد للمنطقتَين القطبيتَين كلتَيهما — نادر إلى أقصى حد، وربما كان حدثًا فريدًا في تاريخ الأرض الطويل. وأيضًا حقيقة وجود أنواع مختلفة من الجليد في كل نصف من نصفَي الكرة الأرضية مستبعدة إلى حد بعيد. والطبيعة غير العادية للغطاء الجليدي الشمالي يمكن أن تجعل العالم بأكمله شديد التأثُّر بالتقلُّبات المناخية التي تعتبر من العوامل الأساسية فيما يتعلَّق بأصول الإنسان. فليست مصادفة أن تتطوَّر سلالتنا خلال الحقبة الجليدية؛ لكن لم تكن برودة الجو هي القوة الدافعة، بل الجفاف.

يتسم عصر الجليد بالجفاف أيضًا. فالمياه المحتجزة في الصفائح الجليدية كان من المفترض أن تكون في البحار لولا ذلك، ومِن ثَم ينخفض مستوى سطح البحر كلما زاد الجليد على اليابسة.[١] فمنذ أقل من ٦ ملايين سنة، كانت الصفائح الجليدية فوق قارة أنتاركتيكا أعلى ممَّا هي عليه الآن بعدة مئات من الأمتار، ومِن ثَم احتُجز قدر كبير من المياه بداخلها، حتى إن مستوى سطح البحر انخفض بمقدار ٥٠ مترًا (مقارنة بمستواه في الوقت الحاضر). كان هذا الارتفاع أقل من أن يتيح للمياه أن تتدفَّق عبر المناطق الضحلة في مضيق جبل طارق، ومِن ثَم جفَّ البحر الأبيض المتوسط؛ والواقع أنه قد جفَّ وامتلأ بصورة متكرِّرة بفعل التذبذبات في حجم الصفائح الجليدية. كذلك كانت هناك صحراء فيما يعرف بالنمسا اليوم. وارتبط هذا التصحُّر ببرودة الكرة الأرضية؛ لأنه عندما يبرد

العالم يقل البخار الناتج عن الرطوبة القادمة من المحيطات، ومِن ثَم يقل تساقط المطر. ومع انخفاض مستويات سطح البحر، ابتعد الحد الفاصل بين اليابسة والبحر أكثر عن المناطق الداخلية من القارات، ومِن ثَم أتيحت فرصة جيدة للسحب التي تحمل الأمطار حتى تُسقط حمولتها قبل حتى أن تصل إلى أماكن مثل النمسا. الأهم من ذلك في قصة أصل الإنسان، أن فترات الجفاف المرتبطة بالعصور الجليدية أثَّرت كذلك على غابات شرق أفريقيا. لم تتغيَّر درجات الحرارة كثيرًا هناك مع انحسار الصفائح الجليدية وتدفُّقها نحو الشمال؛ ولكن نظام هطول الأمطار تغيَّر. سأتناول سبب انحسار الصفائح الجليدية وتدفُّقها بعد قليل، ولكن أيًّا كان السبب، فما يُهم أنه على مدى ملايين السنين القليلة الماضية، تعرَّض شرق أفريقيا إلى نمط شبه إيقاعي بين زيادة هطول الأمطار وانخفاضه؛ فشهدت فترات من الوفرة وفترات من المجاعة.

تعلَّمت الحذر من الخوض في تفاصيل أكثر ممَّا ينبغي عن سمات السلالة التطوُّرية التي أدَّت إلى وجود الإنسان بصورته الحالية؛ لأن ثمة أدلة لم تظهر حتى الآن، وأحيانًا ما يراجع الخبراء تفاصيل الصورة. ولكن الصورة بوجه عام لم تتغيَّر، بناءً على مجموعة من الأدلة الأحفورية وتسلسلات الحمض النووي. وسأركِّز على كيفية تطوُّر الأمور منذ انفصال سلالة أسلاف الإنسان عن سلالات أسلاف أقرب أقربائنا؛ وهي القردة الأفريقية التي تسمَّى الغوريلا والشمبانزي.[٢] تنتمي هذه القردة إلى مجموعة ينتمي إليها الإنسان، تصنَّف ضمن فصيلة القردة العليا؛ ويشمل مصطلح القردة العليا مجموعة أكبر من القرود ومنهم أبناء عمومة الإنسان البعيدين. حدث الانفصال الذي أدَّى إلى ظهور الإنسان تقريبًا منذ مدة تتراوح بين ٣٫٥ و٤ ملايين سنة، مع وجود أدلة تشير إلى أن السلالة التي انحدرت منها الغوريلا انفصلت أولًا، ثم وقع الانفصال بين سلالة الإنسان وسلالة الشمبانزي. من الناحية الجيولوجية، يعتبر هذا الوقت قريبًا على نحو مثير للاهتمام من الوقت الذي انجرفت فيه قارة أنتاركتيكا إلى القطب الجنوبي، وبدأ مناخ شرق أفريقيا في التغيُّر. وبتجميع الأدلة من مصادر مختلفة، يتبيَّن أن نوعًا من القردة الأولية كانت تعيش في غابات شرق أفريقيا على مدى ملايين السنين القليلة التالية أدَّى إلى نشأة ثلاث سلالات من القردة قريبة الشبه بعضها من بعض ولكن لها سمات مميزة، وذلك في الوقت الذي شهد تغيُّرًا ملحوظًا في المناخ. والتخمين الأكثر منطقية لذلك أن التغيُّرات التطوُّرية حدثت استجابة للتغيُّرات البيئية.

ليس من الصعب فهم كيفية حدوث ذلك. فعندما تجف الغابات، تقل مساحتها. وهذا يقلِّل من توافر الموارد ويزيد المنافسة بين الأفراد. وحري بنا أن نوضِّح معنى المنافسة من

منظور التطوُّر. لا يدخل أفراد نوع في منافسة مع أفراد نوع آخر، بل فيما بينهم. فعندما تصطاد الأسود أيلًا، تتنافس الأسود فيما بينها على الإمساك بالفريسة، وتتنافس الأيائل بعضها مع بعض من أجل الفرار. ويؤدِّي سباق التسلُّح الناجم عن تلك المنافسة إلى أسود تتمتَّع بمهارات صيد أفضل، وأيائل تتمتَّع بمهارات عَدو أفضل؛ إذ يتضوَّر الصيادون السيئون جوعًا، ويُؤكَل العدَّاءون البطيئون. في الغابات التي تقلَّصت مساحتها، حصلت أفراد القردة التي حظيت بمهارة أفضل في تسلُّق الأشجار، على سبيل المثال، على مزيد من الثمار، ومِن ثَم عاشت وأنجبت أكثر من منافسيها. ولكن على حافة الغابة، كان ثمة خيار آخر مفتوح أمام القردة الأقل براعة في التسلُّق. فقد طُردوا من الغابة واضطُروا إلى بذل أقصى ما لديهم للتكيُّف على العيش وسط غابات السافانا، حيث كانت القردة التي لديها قدرة أفضل على التكيُّف مع نمط الحياة الجديدة — كأن تكون أفضل في المشي باستقامة مثلًا — تفعل أقصى ما لديها وتركت معظم الأحفاد. وربما كان في ذلك تفسير للتغيُّرات التي فصلتنا عن سلالات القردة الأخرى وحوَّلتنا إلى الصورة البشرية.

ليس واضحًا دائمًا أي فصيل إنساني بالضبط هو السلف المباشر لفصيل بعينه من الإنسان الحديث، ولكن أول جنس اكتسب اسم «إنسان» — وهو الإنسان الماهر أو «الهومو هابيليس» — كان في شرق أفريقيا منذ ما يقرب من ٢٫٥ مليون سنة. كان الإنسان الماهر قردًا يسير مستقيم القامة وكان طوله نحو ١٫٢ متر، وله جسد نحيل ولكن رأسه كبير نسبيًّا وحجم دماغه يبلغ ٦٧٥ سنتيمترًا مكعبًا؛ أي حوالي نصف دماغ الإنسان في الوقت الحاضر، «الهومو سابين» أو الإنسان العاقل. قبل ١٫٥ مليون سنة، ظهر الإنسان المنتصب أو «هومو إريكتوس» على الساحة، وكان طوله ١٫٦ مترًا وحجم دماغه ٩٢٥ سنتيمترًا مكعبًا. وكان هذا هو النوع الذي نشر سلالتنا من أفريقيا إلى آسيا. ولم يكن قبل ٥٠٠٠٠٠ سنة، حتى تطور الإنسان المنتصب إلى الإنسان العاقل، وهو نموذج الإنسان الحديث الذي انتشر في كل قارة على الأرض في النهاية.

لكن التغيُّرات البيئية التي صاحبت هذا التطوُّر، وربما كانت سببًا له، كانت أكبر من مجرَّد انزلاق بسيط إلى ظروف مناخية أكثر برودة وجفافًا. فمن الغريب أن السجلات الجيولوجية توضِّح أنه على مدى ملايين السنين القليلة الماضية، تفكَّكت الحقبة الجليدية إلى نمط متكرِّر تتزايد فيه الكتلة الجليدية وينشأ عصر كامل من الجليد يمتد لنحو ١٠٠٠٠٠ سنة، ثم يحدث احترار طفيف وتتراجع الكتلة الجليدية إلى ما يسمَّى بحالة بين جليدية لنحو ١٠٠٠٠ سنة. تطوَّرت الحضارة الإنسانية بأكملها خلال أحدث فترة من العصر

بين الجليدي، ولكننا لا نزال في حقبة جليدية. وهذا يعني، في شرق أفريقيا، أن الغابات تجف وتمر أوقات عصيبة لمدة ١٠٠٠٠٠ سنة أو نحو ذلك. في قلب الغابة، لا يتأثَّر ساكنو الأشجار المهرة إلى حد كبير، ويستمر نمط حياتهم دون تغيير. أمَّا على حدود الغابة، فيوجد ضغط تطوُّري قوي إذ يموت العديد من الأفراد. ويزداد تأقلم الناجين القلائل على الظروف المحيطة بهم على نحو جيد، ولكن ربما تقل أعدادهم حتى يشارِفوا على الاندثار والفناء. بعد ذلك، يكون هناك ١٠٠٠٠ سنة أو نحو ذلك تتسم بوفرة الموارد، ومِن ثَم ينطلق الناجون ويتضاعف عددهم. وكل منعطف في الدُّوَّامة البيئية يدعم التطوُّر تدريجيًّا بخطوة أخرى.

ما مقوِّمات البقاء التي ستتطوَّر بتلك الطريقة في المنطقة الحدودية بين الغابة والسافانا؟ تتلخَّص الإجابة في كلمتَين: قابلية التكيُّف والذكاء. ومن بين الكلمتَين، يمكن القول إن التكيُّف هو الأهم. بعض الحيوانات أسرع من الإنسان في الركض وبعضها أفضل في السباحة، وبعضها يتمتَّع بمخالب وأسنان أقوى للقتل وأكل اللحم، وبعضها له أجهزة هضمية أكثر ملاءمة لهضم النباتات من الجهاز الهضمي لدى الإنسان. لكننا نجيد القيام بقدر من كل هذه الأشياء بمهارة كبيرة؛ وتلك تحديدًا هي سمات البقاء اللازمة عندما تشح الموارد وتحتد المنافسة عليها. ويُعد الذكاء، لا سيما القدرة على معرفة المكان الذي ستأتي منه الوجبة التالية مقدمًا، هو السمة المميزة للإنسان. ما كان لتصبح هناك حاجة إلى كل هذا[٣] لو لم يكن هناك حقبة جليدية، وكانت هناك وفرة من الغابات الخصيبة الوارفة الزاخرة بالموارد. على النقيض من ذلك، لو لم ينحسر الجفاف، لربما اندثرت فصيلة القردة التي سيقت إلى حدود الغابة قبل أن تتطوَّر لديها تلك السمات. وهذا الإيقاع الغريب الذي تميَّزت به العصور الجليدية هو ما جعل منَّا بشرًا.

هذا ليس مجرَّد تكهُّن؛ لأن لدينا دليلًا دامغًا على هذا النمط من التغيُّر المناخي. تتكشَّف الصورة الكبرى من خلال مجموعة من السجلات الجيولوجية تمتد لملايين السنين، ولكن الدليل القاطع على ما كان يجري يأتي من السجلات التفصيلية لمليون سنة ماضية أو نحو ذلك. تتوفَّر التفاصيل من خلال نظائر عناصر مثل الكربون والأكسجين، محتبسة في فقاعات الهواء في جليد قارة أنتاركتيكا، أو في شكل الكربونات التي تحتوي عليها أصداف مخلوقات نفقت منذ مدة طويلة في الطين في قاع البحر. يحتوي لباب هذه الكائنات الذي يُنقَّب عنه بالحفر في الجليد أو الطين على عينات ترسَّبت عامًا بعد عام، ومِن ثَم فإن التعمُّق في اللب يُشبه العودة بالزمن، ويمكن تحديد تاريخ الطبقات المختلفة

باستخدام مجموعة تقنيات لا يتسع المجال لذكرها هنا.[٤] إن النظائر تروي قصة؛ لأن نِسب تواجدها في الهواء، ومِن ثَم في الفقاعات أو الأصداف، تعتمد على درجة الحرارة. على سبيل المثال، الأكسجين-١٨ أثقل من الأكسجين-١٦، ولذلك تكون المياه (H_2O) التي تحتوي على الأكسجين-١٨ أصعب في التبخُّر من البحر؛ والتوازن بين نسب نظائر الكربون في الكربونات الموجودة في رواسب أعماق البحار يوضِّح أيضًا للباحثين كيف كانت درجة الحرارة عندما تكوَّنت تلك الرواسب. تُستخدم آثار أخرى للكشف عن درجات الحرارة في الماضي من عينات لب الجليد. تشير النتائج إلى وجود نمط معقَّد من التغيُّرات على المليونَي السنة الماضيَين، ولكن يمكن كشف خيوط هذا النمط (فيما يُعَد مهمة أخرى لتحليل طيف الطاقة) للكشف عن أن العنصر المسيطر عليه هو عبارة عن مزيج من ثلاث دورات متكرِّرة وبعض المكوِّنات الثانوية. وتلك الدورات هي التي تسبَّبت في هذا النمط المميز للعصور الجليدية والفترات الفاصلة بينها. لكن اكتشاف هذه الإيقاعات في أواسط سبعينيات القرن العشرين لم يكن مفاجأة؛ نظرًا لسابقة التنبُّؤ بهذا النمط للعصور الجليدية قبل ظهور أي دليل جيولوجي، وقبل أن يعرف أحد أي شيء عن تفاصيل أصول الإنسان.

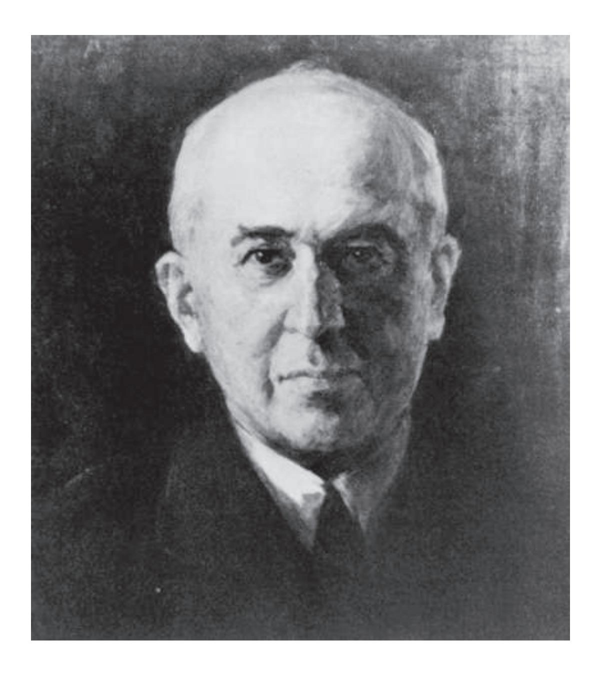
نشأ التنبُّؤ من دراسة للعالم الاسكتلندي ويليام كرول في القرن التاسع عشر، ولكن الصربي ميلوتين ميلانكوفيتش صاغه بتفصيل دقيق من خلال إجراء عمليات حسابية مطولة للغاية بالورقة والقلم، ومعظم تلك الحسابات أجراها بينما كان أسير حرب في المجر إبَّان الحرب العالمية الأولى. يشار إلى النتائج التي توصَّل إليها في بعض الأحيان باسم النظرية الفلكية للعصور الجليدية، ولكن الاسم الأكثر شيوعًا هو نموذج ميلانكوفيتش. يعتمد التنبُّؤ بالكامل على الجغرافيا غير العادية للعالم في الوقت الحاضر، بالنظر إلى أن محيط القطب الشمالي المغطى بالجليد تحيط به اليابسة من جميع الجهات تقريبًا. وبسبب هذا التكوين، يهطل الجليد كل شتاء على اليابسة عند خطوط العرض العالية. في الوقت الحاضر، في الفترة بين عصرَين جليديَّين، يذوب الجليد في كل صيف. ولكن ما الذي سيحدث إن لم يذب؟ الثلج أبيض، ويمتاز بخصائص عاكسة قوية. ومن خلال عكس حرارة الشمس، سيؤدِّي إلى خفض حرارة العالم، وهو ما يحدث بغض النظر عن مدى رقة سُمك طبقة الجليد. في الشتاء التالي، الذي يبدأ بدرجة حرارة أقل من الشتاء السابق، يهطل المزيد من الجليد على قمة الجليد المتبقي من الأعوام الماضية وامتدادًا إلى أقصى الجنوب. ومن الناحية الجيولوجية، تتكوَّن صفيحة جليدية تنمو طوليًّا وعرضيًّا في فترة زمنية قصيرة. ثمة ارتجاع إيجابي سوف يحافظ على العصر الجليدي إلى أن يحدث تغيير

ملحوظ. فلا يمكن أن يحدث شيء من هذا فوق سطح البحر؛ حيث يذوب جليد الشتاء عند الاحتكاك بالماء لكونه أدفأ من نقطة التجمُّد. والسؤال المهم هنا ليس عن سبب وجود عصور جليدية. فالوضع الطبيعي لنصف الكرة الشمالي، بناءً على جغرافيا العالم في الوقت الحاضر، أن يعيش في عصر جليدي؛ إذ إن قارة أنتاركتيكا مغطاة بالجليد دائمًا على أي حال. السؤال الذي ينبغي طرحه هو لماذا توجد عصور بين جليدية. ومن هنا تأتي حسابات ميلانكوفيتش وخلفائه.

ليس المهم مدى برودة فصول الشتاء، بل مدى حرارة فصول الصيف. فلا ينتهي عصر جليدي إلا مع تعاقب سلسلة من فصول صيف حارة تعيد إذابة أطراف الجليد كاشفة عن أرض داكنة تمتص المزيد من حرارة الشمس وتسرِّع ذوبان الجليد في عملية ارتجاعية أخرى. المفاجأة — لغير علماء الفلك — أن التوازن بين الفصول يتغيَّر على هذا النحو، وذلك بفعل التغيُّرات في مدار الأرض وهي تدور حول الشمس، وبفعل الطريقة التي تتذبذب بها على محورها وهي تدور في مدارها. وهذا ما عكف ميلانكوفيتش سنوات على حسابه بيده، قبل عقود من ظهور أجهزة الكمبيوتر الكهربية.

لن تتفاجأ عندما تعلم بوجود ثلاثة مكونات أساسية لتلك التغييرات. تتعلَّق الدورة الأطول بالمدار نفسه؛ لأن بسبب تأثيرات جاذبية الأجسام الأخرى في المجموعة الشمسية، يتغيَّر شكله من بيضاوي قليلًا ليصبح أقرب إلى الشكل الدائري ويعود مرة أخرى إلى أصله كل ١٠٠٠٠٠ سنة تقريبًا. في الوقت الحاضر، يميل المدار كثيرًا إلى الشكل الدائري (إذ يقترب الانحراف المركزي من صفر)، لكن منذ بضعة آلاف سنة، كان المدار مستطيلًا نسبيًّا بنسبة انحراف بلغت نحو ٦ بالمائة. ثمة تأثير آخر يسمَّى مبادرة الاعتدالَين، وينتج عن تذبذب الأرض مثل البلبل الدوار. إن الخط الوهمي الذي يربط القطب الشمالي بالقطب الجنوبي ليس عموديًّا على الخط الذي يربط مركز الأرض بمركز الشمس، ولكنه يميل بنحو ٢٣٫٤ درجة عن الخط العمودي. والميل، كما ذكرت من قبل، هو الذي يعطينا دورة الفصول؛ ففي الجزء من مدار الأرض حيث يميل القطب الشمالي نحو الشمس، يحل فصل الصيف على الشمال. وبعد ستة أشهر، يحل الشتاء على الشمال. وبالطبع يكون العكس في الجنوب على الدوام. وعلى مدى دورة واحدة، «يتجه» القطب الجنوبي دومًا إلى الجزء نفسه من السماء (في المكان نفسه في خلفية النجوم)، ولكن على مدى دورة يبلغ طولها نحو ٢٠٠٠٠ سنة تقريبًا، فإنه يتبع دائرة بطيئة في السماء.

ولكن ليس هذا كل شيء. على نطاق زمني أطول، حوالي ٤١٠٠٠ سنة، يتغيَّر الميل نفسه؛ إذ يظل بين صعود وهبوط في نطاق يتراوح بين ٢٤٫٤ درجة (مائل في الأغلب)



ميلوتين ميلانكوفيتش (ساينس فوتو ليبراري).

و٢١,٨ درجة (مستقيم في الأغلب). يقع الميل الحالي في المنتصف تقريبًا بين هذَين الطرفَين، وظل يتضاءل على مدى عشرة الآلاف السنة الماضية. وهذا يعني أنه على مدى عشرة الآلاف السنة الماضية، ظل الفرق بين الفصول يتضاءل. ليس من قبيل المصادفة أن العصر الجليدي الأحدث قد انتهى وبدأ العصر بين الجليدي؛ إذ كان الميل في أقصى نقطة، وكان هناك تباين أكبر بين الفصول. وعلى الرغم من أن إجمالي كم الحرارة التي نتلقاها من الشمس على مدى عام كامل واحد على الدوام، فإن ما يهم هو مدى حرارة الصيف في نصف الكرة الشمالي بغض النظر عن مدى برودة الشتاء.

بمعالجة جميع الأرقام على أجهزة الكمبيوتر الحديثة وإدراج بعض التأثيرات البسيطة، يتضح وجود تطابق بالغ بين حسابات كمية الحرارة التي يتلقَّاها نصف الكرة الشمالي في الصيف وبين نمط العصور الجليدية والفترات بين الجليدية التي تكشف عنها عينات الجليد وعينات رواسب أعماق البحار. إذن فالنظرية الفلكية عن العصور الجليدية صحيحة.

لكن لم تنتهِ القصة بعد. ما الذي يتحكَّم في ميل الأرض وتذبذبها؟ القمر. فمن دون تأثير القمر المثبت، كما ذكرت آنفًا، كان من الممكن أن يتفاوت ميل الأرض بمقدار يصل إلى ٨٥ درجة. وفي حالة كهذه، كانت التقلُّبات الحادة في المناخ ستجعل من المستحيل على الكائنات الحية مثل الإنسان أن تتطوَّر. والفضل يعود إلى القمر في وجود إيقاعات نموذج ميلانكوفيتش التي صنعت البشر من قردة الغابة. وذلك احتمال مستبعد مناسب لنترككم عنده.

هوامش

(١) ليس للجليد العائم تأثير على مستوى البحر؛ لأنه يشغل المساحة التي يشغلها الماء الذي يزيحه.

(٢) في أي نظام تصنيفي منطقي، كنَّا لنعتبر قردة أفريقية نحن أيضًا، ولكن بما أن من وضعوا هذا التصنيف كانوا بشرًا، فقد أُدرجنا في فئة مستقلة.

(٣) ما أعنيه بذلك أنه لم يكن ليصبح هناك أي ضغط انتقائي يدعو إلى تطوُّر هذه السمات.

(٤) انظر كتاب جون إمبري وكاثرين إمبري، «العصر الجليدي»، مطبعة جامعة هارفارد، ١٩٨٦.

قراءات إضافية

مراجع سهلة

Marcia Bartusiak, *Einstein's Unfinished Symphony*, Yale University Press, 2017.

John Gribbin, *Deep Simplicity*, Penguin, London, 2005.

John Imbrie and Katherine Imbrie, *Ice Ages*, Harvard University Press, 1986.

Lawrence Krauss, *A Universe From Nothing*, Free Press, New York, 2012.

James Lovelock, *The Revenge of Gaia*, Allen Lane, London, 2006.

مراجع متوسطة

Nick Lane, *The Vital Question*, Profile, London, 2015.

Richard Westfall, *Never at Rest*, Cambridge University Press, 1983.

مراجع صعبة

Charles Misner, Kip Thorne, and John Wheeler, *Gravitation*, Princeton University Press, 2017.

T. Padmanabhan, *After the First Three Minutes*, Cambridge University Press, 1998.

مراجع أدبية

John Gribbin and Marcus Chown, *Double Planet*, Gollancz, London, 1988.
Rudyard Kipling, *Just So Stories*, Wordsworth Children’s Classics, London, 1993.

